ORSAY
N° d'ordre : 3286

THESE

PRESENTEE

A L'UNIVERSITE DE PARIS SUD

CENTRE D'ORSAY

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR 3ème CYCLE

Spécialité : PHYSIQUE NUCLEAIRE
Option : PHYSIQUE DES REACTEURS

par

Ahmed HASSINI

ETABLISSEMENT DE BIBLIOTHEQUES A CONTRE-REACTIONS POUR LE SUIVI DU 1er CYCLE DU REACTEUR FESSENHEIM

Soutenue le 24 septembre 1982, devant la Commission d'Examen

MM. HERPIN — Président

BERGERON
CARRE
CHABRILLAC
LEFEBVRE
— Examinateurs

UNIV.
LIBRARY
UTAH

ORSAY
N° d'ordre : 3286

THESE

PRESENTEE

A L'UNIVERSITE DE PARIS SUD

CENTRE D'ORSAY

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR 3ème CYCLE

Spécialité : PHYSIQUE NUCLEAIRE
Option : PHYSIQUE DES REACTEURS

par

Ahmed HASSINI

ETABLISSEMENT DE BIBLIOTHEQUES A CONTRE-REACTIONS POUR LE SUIVI DU 1er CYCLE DU REACTEUR FESSENHEIM

Soutenue le 24 septembre 1982, devant la Commission d'Examen

MM.	HERPIN	Président
	BERGERON CARRE CHABRILLAC LEFEBVRE	Examinateurs

REMERCIEMENTS

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur J. BUSSAC, Chef de Cabinet du Haut-Commissaire pour m'avoir autorisé à préparer cette thèse.

Je remercie Monsieur A. HERPIN, Directeur de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (C.E.N. SACLAY) et Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie pour avoir bien voulu présider le jury de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur M. CHABRILLAC, Professeur à l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires et Chef de la Division Procédés à FRAMATOME, qui a assumé la direction de cette étude.

Je tiens également à remercier Monsieur J.P. SCHWARTZ pour son accueil dans le Service d'Etudes de Réacteurs et de Mathématiques Appliquées (SERMA).

Monsieur J. BERGERON, qui m'a orienté et soutenu pour la conduite de ce travail et les critiques instructives, qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

Je remercie vivement Monsieur F. CARRE pour les enseignements précieux et l'aide fructueuse qu'il a porté à l'égard de cette étude.

Je remercie également Monsieur J.C. LEFEBVRE, qui a eu la sympathie d'être membre du Jury.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes du Service d'Etudes de Réacteurs et de Mathématiques Appliquées et plus particulièrement Monsieur A. LOTTIN et Mademoiselle D. JAGER pour leur aide efficace et amicale.

J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur G. DE ROSNY, pour les idées enrichissantes qui m'ont aidé à rédiger ce document.

La présentation et la réalisation matérielle de ce document ont été assurées par Mesdames F. VALLETTE et F. LEBRUN, qu'elles trouvent ici l'expression de mes sentiments respectueux.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543523_0004

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

Chapitre I : DESCRIPTION DU COEUR DU REACTEUR FESSENHEIM

I.1 - Description générale
I.2 - Quelques caractéristiques thermohydrauliques du modérateur
I.3 - Description des assemblages
I.4 - Enrichissement
I.5 - Poisons consommables
I.6 - Instrumentation
  I.6.1. - Instrumentation des assemblages
  I.6.2 - Principe de fonctionnement de la chambre à fission
  I.6.3 - Quelques caractéristiques de la chambre à fission

Chapitre II : APERCUS GENERAUX SUR LE SCHEMA DE CALCUL

II.1 - Introduction
II.2 - Représentation schématique d'un assemblage pour le calcul de diffusion à deux dimensions
II.3 - APOLLO
II.4 - EQUIPAGE
II.5 - Représentation des sections efficaces pour le calcul de diffusion
II.6 - VELPO
II.7 - PARASITE
II.8 - Schéma de calcul DIANE
  II.8.1 - Activation des contre-réactions
  II.8.2 - Activation de l'effet modérateur
  II.8.3 - Activation de l'effet Doppler
  II.8.4 - Calcul de diffusion en contre-réaction

Chapitre III : ETUDE DE SENSIBILITES DES SECTIONS EFFICACES AUX EFFETS DE PUISSANCE

A - Recherche des sections efficaces sensibles aux effets de puissance
A.1 - Introduction
A.2 - Simplification des contre-réactions
  A.2.1 - Taux d'irradiation
  A.2.2 - Découplage des effets de températures
A.3 - Présentation d'une bibliothèque
A.4 - Calcul du facteur de multiplication en milieu infini
A.5 - Choix de la cellule combustible
A.6 - Sensibilité des sections aux effets de températures
  A.6.1 - Assemblage sans poison

A.6.1.1 - Effet modérateur
A.6.1.2 - Effet Doppler
A.6.2 - Effets du poison et de l'enrichissement
A.6.2.1 - Effet du poison
A.6.2.2 - Effet de l'enrichissement
A.6.2.3 - Conclusion
A.6.3 - Détermination préliminaire du degré des ajustements
A.6.4 - Comparaison des $\Delta\sigma/\sigma$ suivant la position géométrique de la cellule dans l'assemblage

A.7 - Conclusion

B - Présentation du programme d'interface parasite
B.1 - Introduction
B.2 - Méthode d'ajustement parasite
B.2.1 - Détermination des coefficients d'ajustements de π_1 et π_2
B.2.1.1 - Détermination des coefficients α, β, γ de π_1
B.2.1.2 - Détermination des coefficients α', β', γ' de π_2
B.2.2 - Conversion d'une précision sur la réactivité en précision sur la section
B.2.2.1 - Cas général
B.2.2.2 - Absorption du corps 10
B.2.2.3 - Transport du corps 10
B.2.2.4 - Transport du corps 10

B.3 - Conclusion

C - Comparaisons des résultats relatifs à des ajustements obtenus avec différentes précisions
C.1 - Introduction
C.2 - Comparaisons des résultats obtenus avec les différents ajustements
C.3 - Proportions des sections ajustées
C.4 - Temps de calcul
C.5 - Conclusion

IV - COMPARAISONS DES CALCULS DE CONTRE-REACTIONS SUR DES ASSEMBLAGES ENTRE DIANE ET APOLLO

IV.1 - Introduction
IV.2 - Traitement des bibliothèques
IV.3 - Utilisation et résultats du code PARASITE
IV.3.1 - Utilisation
IV.3.2 - Résultats PARASITE

IV.4 - Calculs des contre-réactions DIANE
IV.4.1 - Essai d'activation dans les conditions nominales
IV.4.2 - Résultats d'activation sur les assemblages

IV.5 - Evaluation des incertitudes dans les calculs de contre-réactions DIANE
IV.5.1 - Origine des écarts DIANE-APOLLO sur un assemblage sans poison
IV.5.1.1 - Définition

IV.5.1.2 - Conditions nominales
IV.5.1.3 - Etats de température autres que les conditions nominales

IV.5.2 - Effets relatifs aux hypothèses de simplification des contre-réactions
IV.5.2.1 - Liaison entre les corrections dues aux effets de contre-réactions et l'irradiation
A) Assemblage enrichi à 3,1 % sans poison, 600 ppm de bore
B) Cas des poisons consommables

IV.5.2.2 - Calcul des contre-réactions avec couplage des températures
IV.5.2.3 - Influence de la concentration du bore

IV.5.3 - Résumé

V - CALCUL DU PREMIER CYCLE DU COEUR FESSENHEIM

V.1 - Introduction
V.2 - Condition du calcul
V.2.1 - Configuration géométrique
V.2.2 - Constantes neutroniques du réflecteur
V.2.3 - Constantes neutroniques de la chambre à fission
V.2.4 - Ajustement de la réactivité en évolution : réaction (n, 2n)

V.3 - Données expérimentales
V.4 - Comparaisons des résultats entre calculs et expériences
V.4.1 - Réactivité
V.4.2 - Comparaison des activités

V.5 - Sources d'erreurs
V.5.1 - Réactivité
V.5.2 - Interprétation des cartes d'activité
V.5.2.1 - Ajustement des sections de la chambre à fission
V.5.2.2 - Distribution de puissance et d'activité

V.6 - Temps de calcul coeur
V.7 - Conclusion

CONCLUSION GENERALE

ANNEXE

INTRODUCTION

L'interprétation des mesures effectuées dans les réacteurs nucléaires rendent indispensable la connaissance de la distribution fine de puissance ; celle-ci permet en outre de localiser le crayon le plus chargé et le pic local de puissance. Ce calcul peut être réalisé par le code DIANE 2 qui résout l'équation de la diffusion par la méthode des différences finies, sur un maillage fin en espace (crayon par crayon).

Le but de la présente étude est la réalisation de bibliothèques de sections efficaces pouvant tenir compte des effets de contre-réaction dans le formalisme DIANE. Nous effectuons à l'aide de ce code, utilisant les bibliothèques ainsi constituées, un suivi du cycle 1 du réacteur FESSENHEIM. C'est un réacteur de grandes dimensions, refroidi à l'eau pressurisée, où les effets de contre-réactions sont importants et dont il faut tenir compte dans les calculs de distribution de puissance.

Le coeur neuf du réacteur est composé de plusieurs assemblages de crayons combustibles. Ces assemblages sont distincts par l'enrichissement et le nombre de poisons consommables. Les sections efficaces, exprimant les probabilités d'interactions des neutrons avec les matériaux qui constituent le coeur, dépendent du type d'assemblage, de l'usure du combustible , des températures du modérateur du combustible ...

On ne peut envisager l'application à l'ensemble du coeur, d'un calcul du transport multigroupe (APOLLO). On restreint son application à un motif (assemblage) représentatif du coeur pour déterminer en milieu infini, les constantes neutroniques (sections efficaces et concentrations) équivalentes des cellules (motifs de l'assemblage) homogénéisées et à peu de groupes d'énergie, en général 2 ou 4. Il est alors possible d'utiliser l'équation de la diffusion, pour calculer la distribution du flux dans le coeur entier.

Le code DIANE peut effectuer des calculs de flux avec évolution du combustible et prendre en compte des effets de contre-réactions à chaque pas d'évolution. Compte tenu du maillage fin en espace et du nombre de pas d'évolution, un nombre important de paramètres neutroniques doit être pris en compte et leur obtention par le calcul de transport est onéreuse. Le schéma des contre-réactions utilisé dans DIANE repose sur la simplification par découplage des effets de température du modérateur et du combustible à une irradiation moyenne (12000 MWJ/t) et d'en déduire les corrections multiplicatives liées à ces effets. Ces corrections sont appliquées aux autres pas d'évolution ; il suffit alors de les ajuster en fonction de la température du modérateur et de la température du combustible et le coût du calcul des contre-réactions est fonction du nombre de corrections et du degré polynomial.

Le but du travail entrepris est l'étude des contre-réactions ainsi simplifiées, en trois parties, au niveau d'une cellule, d'un assemblage et du coeur :

1. On s'intéresse en premier lieu à rechercher les sections efficaces sensibles à l'effet de densité de l'eau et à l'effet Doppler au niveau d'une cellule combustible, considérée dans différentes configurations d'assemblage (enrichissement, poison). Cette recherche s'effectuera à l'irradiation de 12 000 MWJ/t où tous les isotopes et les produits de fission existent en quantité appréciable afin de limiter les ajustements aux sections sensibles, aux effets de contre-réactions, relativement à un critère de précision choisi. Une description du programme PARASITE est détaillée ; ce programme est prévu pour réaliser un paramétrage polynomial des corrections liées aux effets de puissance en fonction de la densité de l'eau et de la température du combustible. Il permet en outre, le choix du degré minimum des polynômes respectant un critère de sensibilité sur la réactivité. Ce chapitre se poursuit par une analyse de la précision obtenue sur les coefficients de température pour une confirmation de la valeur du critère de sensibilité donnant la meilleure précision avec un temps de calcul acceptable.

2. Une étude complémentaire est entreprise pour qualifier le modèle simplifié des contre-réactions utilisé dans DIANE sur des assemblages dans différents états. L'état d'un assemblage dans le coeur, est caractérisé par le taux de combustion, les températures moyennes, la concentration de bore soluble. Nous analysons l'incidence de la variation de chacun de ces paramètres sur les corrections liées aux effets de températures, pour mieux connaître les limites de validité du modèle. L'influence de l'irradiation (ou taux de combustion) sur les corrections, due à la variation du spectre neutronique à 0 et 24 000 MWJ/t, est évaluée en terme de réactivité. Cette évaluation est déduite en supposant que l'erreur, à une température donnée, due à l'ajustement PARASITE est conservative pour toute irradiation. Dans la plupart du temps nous nous référons aux calculs APOLLO.

3. Le suivi du réacteur FESSENHEIM durant son premier cycle sera effectué avec prise en compte des effets de contre-réactions et constitue l'aboutissement de cette étude. Le suivi consiste à établir des comparaisons entre les calculs DIANE et les mesures expérimentales sur les cartes d'activité dans les assemblages instrumentés par la chambre à fission qui simulent l'activité dans les assemblages. Un travail de synthèse (par comparaison avec d'autres travaux) permet de dégager une explication et la tendance des écarts calcul-expérience constatés.

Avant d'entreprendre ces études, il est nécessaire de rappeler dans les deux premiers chapitres, la description générale du coeur du réacteur FESSENHEIM et le schéma de calcul utilisé.

CHAPITRE I

DESCRIPTION DU COEUR DU RÉACTEUR FESSENHEIM

I.1. - DESCRIPTION GENERALE

Le réacteur de FESSENHEIM est un réacteur à eau pressurisée. Il est destiné à la production d'une quantité d'énergie de 2652 MW thermiques ou environ 900 MW électriques, dont 97,4% est produite dans le combustible dans les conditions nominales de fonctionnement.

A l'intérieur du coeur (figure 1.1.) sont répartis 157 assemblages de type 17 x 17 contenant des crayons combustibles ayant une hauteur active de 365,8 cm et sont disposés verticalement. Les assemblages sont juxtaposés pour former une région centrale dans la cuve, d'un diamètre équivalent à froid de 304,0 cm et entourés par un baffle en acier pour les maintenir en place. Le pas des assemblages est de 21.504 cm. Ceux-ci sont immergés dans l'eau préssurisée de pression moyenne 155,1 bars. L'eau joue le rôle de :

- fluide caloporteur,
- modérateur,
- réflecteur.

I.2. - QUELQUES CARACTERISTIQUES THERMOHYDRAULIQUES DU MODERATEUR

- Température à chaud puissance nulle (au démarrage)	286,1°C
- Température d'entrée à chaud pleine puissance	284°C
- Température moyenne du coeur à pleine puissance	306,3°C
- Température de sortie à chaud pleine puissance	321,8°C

I.3. - DESCRIPTION DES ASSEMBLAGES

Chaque assemblage contient 264 crayons de combustible constitués par des pastilles de dioxyde d'uranium faiblement enrichi en ^{235}U. Les pastilles sont gainées par un tube de Zircaloy. Chacun des 25 autres tubes de Zircaloy est entouré par un manchon en acier soudé sur 8 grilles transversales. Les tubes sont insérés avec les crayons combustible pour recevoir soit les grappes de contrôle soit les poisons consommables soit les sources ; le tube central est généralement prévu pour l'instrumentation.

- Pas du réseau (en cm)	1,26
- Diamètre extérieur de la gaine (cm)	0,950
- Diamètre intérieur de la gaine (cm)	0,836
- Diamètre des pastilles d'UO_2 (cm)	0,819
- Fraction volumique de l'UO_2 dans les pastilles	0,9882
- Densité de l'UO_2 (à froid)	10,412

I.4. - ENRICHISSEMENT

Pour avoir une distribution de puissance radialement uniforme, trois valeurs d'enrichissement sont utilisées 2,1% ; 2,6% et 3,1%. Les assemblages ayant les deux premiers enrichissements recouvrent le centre du coeur en damier, les assemblages à 3,1% constituent la périphérie.

I.5. - POISONS CONSOMMABLES

Le contrôle de l'excès de réactivité est assuré par la dissolution du bore - acide borique - dans l'eau. Le coefficient de température du modérateur devient positif quand la concentration en bore dépasse une certaine limite. Pour maintenir ce coefficient négatif et particulièrement en début de vie, une antiréactivité complémentaire est ajoutée par l'introduction de poisons consommables sous forme de barreaux de pyrex (BP), c'est du verre au borosilicate qui contient 12,5% en poids de B_2O_3. Seuls les assemblages aux enrichissements 2,6% et 3,1% sont "empoisonnés". Sept types d'assemblages figurent dans le premier coeur de Fessenheim, qui différent par l'enrichissement (e) et le nombre de poisons consommables (BP).

e (en %)	BP	Pourcentage de chaque type d'assemblage
2,1	0	34
2,6	12	3
2,6	16	25
2,6	20	5
3,1	0	23
3,1	12	5
3,1	16	5

La figure 1.2. donne la répartition de ces assemblages dans le coeur. Les figures 1.3. à 1.6. donnent les répartitions des poisons consommables dans l'assemblage.

I.6. - INSTRUMENTATION

I.6.1. - INSTRUMENTATION DES ASSEMBLAGES

L'instrumentation de mesure réservée au tube central d'un assemblage est une chambre à fission qui est un détecteur destiné aux mesures de flux. Les chambres à fission utilisées sont au nombre de 5 ; chacune peut explorer 10 assemblages grâce à un système d'aiguillage précis. Soit 50 assemblages sont prévus pour recevoir la chambre à fission: la figure (1.7.) localise ces assemblages.

I.6.2. - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA CHAMBRE A FISSION

Le principe de fonctionnement de la chambre à fission (voir figure 1.8.) repose sur l'ionisation d'un gaz (Argon à 1,1 bar) par les fragments de fission lorsque celle ci est exposée dans un flux de neutrons. Les fissions sont produites dans l'uranium (enrichi à 93%) sous forme de dépôt sur l'anode. Le signal électrique esttransmis par câble.

Pendant les périodes de non utilisation, les chambres à fission sont retirées en dehors du coeur.

I.6.3. - QUELQUES CARACTERISTIQUES DE LA CHAMBRE A FISSION

- Les dimensions sont réduites afin que la distribution spatiale du flux ne soit trop perturbée et que la mesure soit relativement ponctuelle.

- Bon rapport signal/bruit.

- Conservation des caractéristiques sous l'effet des irradiations et indépendamment de la consommation du matériau fissile.

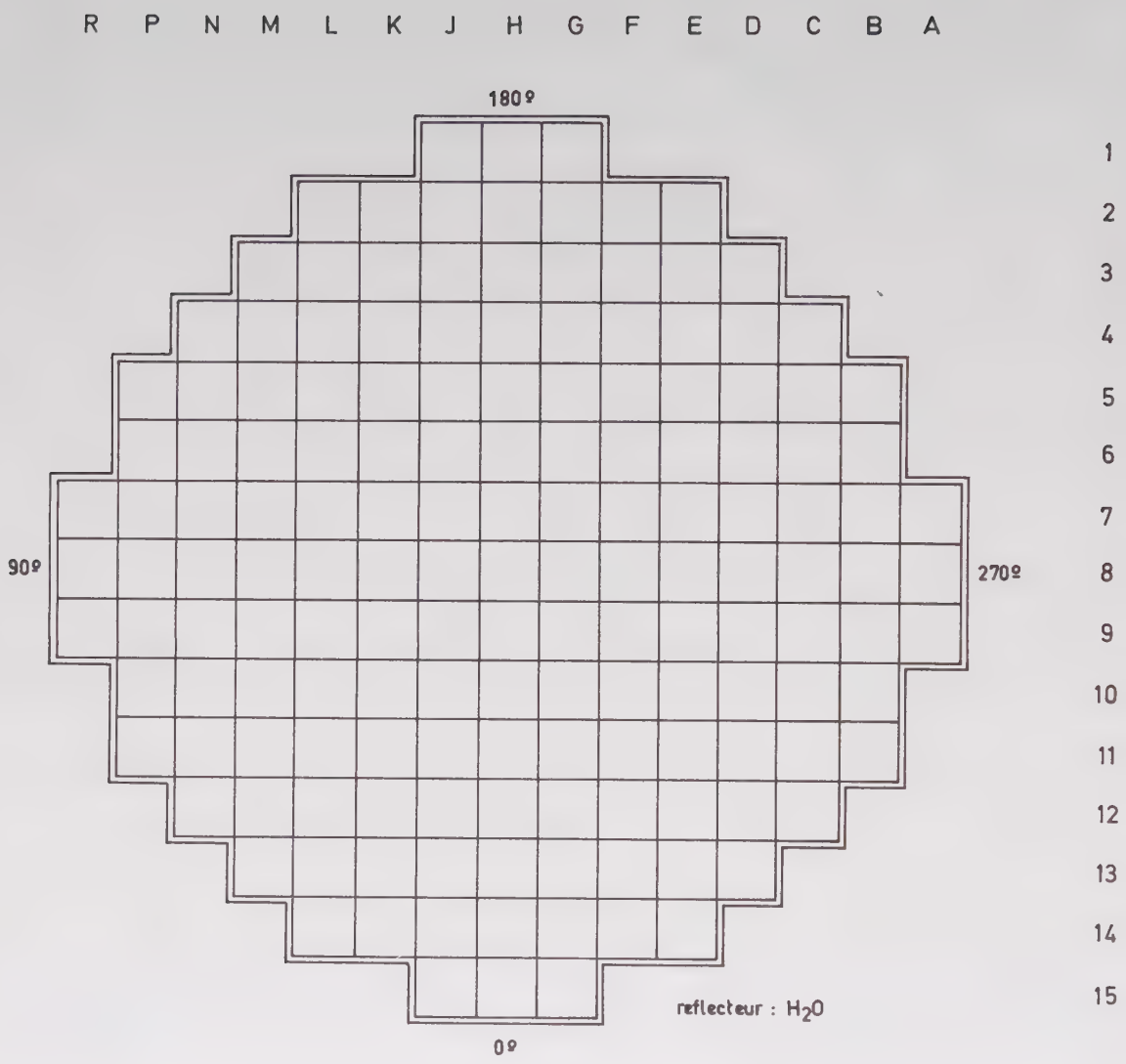


Fig. 1_1 : Coupe radiale du cœur de FESSENHEIM avec baffle autour des assemblages.

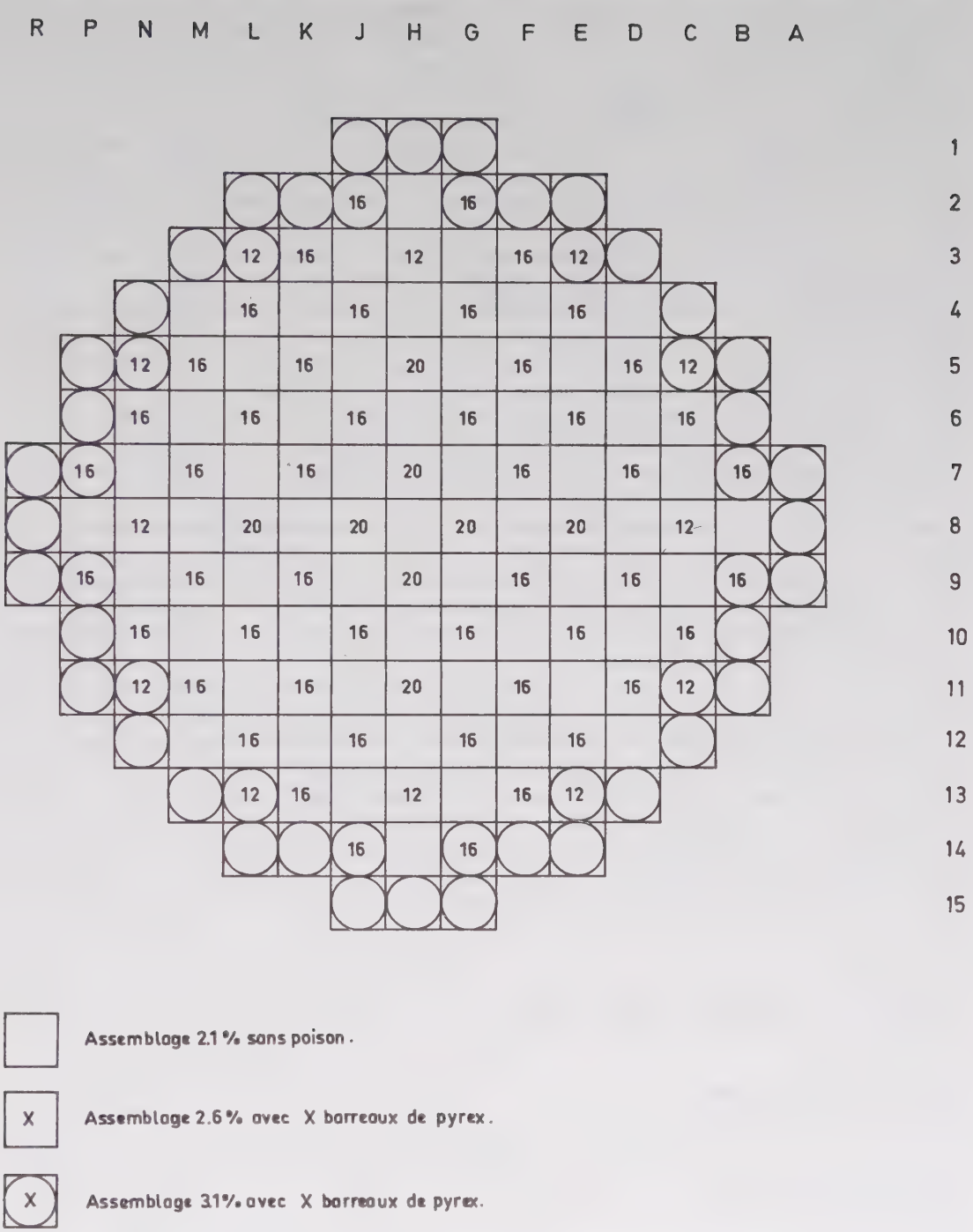
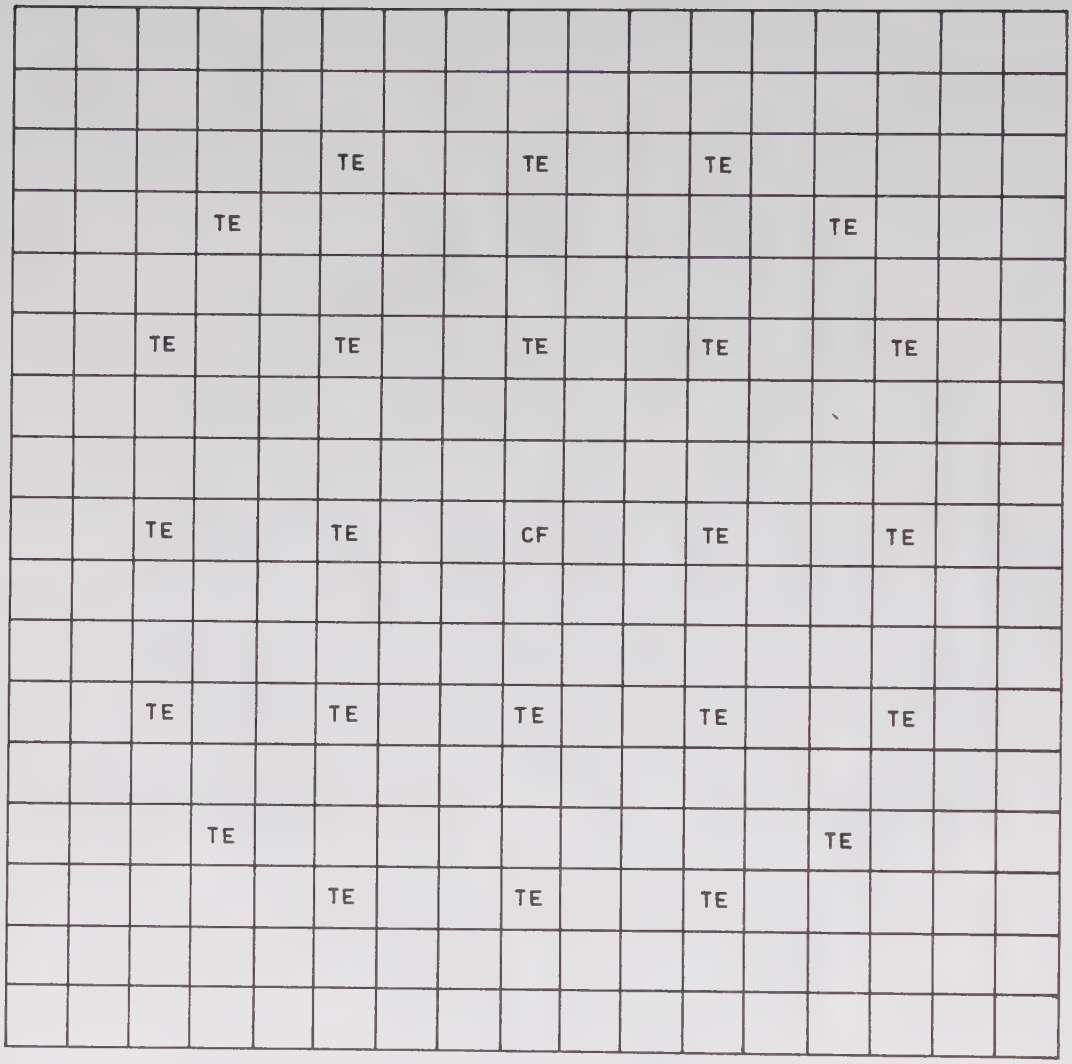


Fig. 1.2 : Répartition des 7 assemblages dans le coeur.

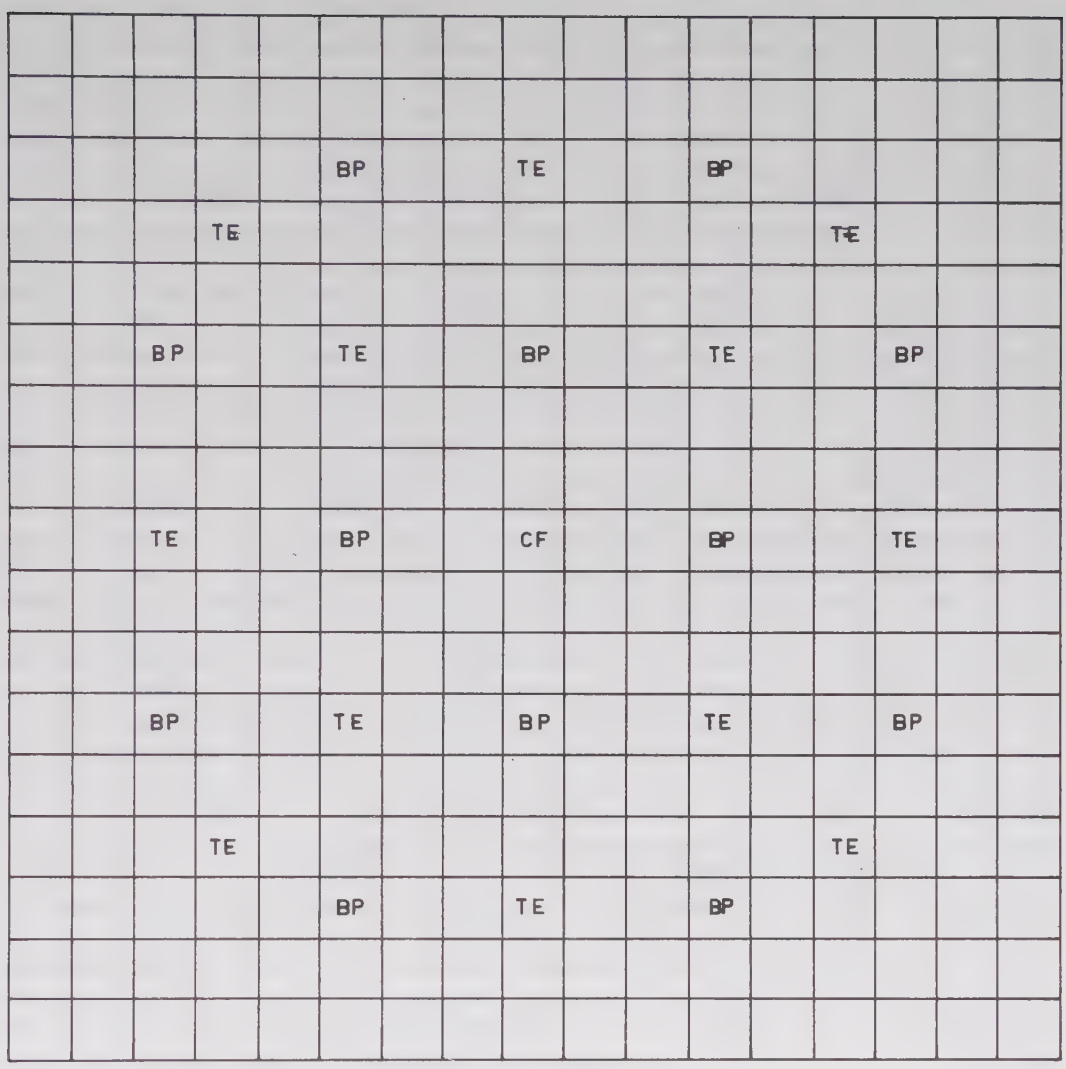


CF Cellule contenant la chambre à Fission

TE Cellule "trou d'eau"

Cellule combustible

Fig. 1.3 : assemblage sans poison consommable.



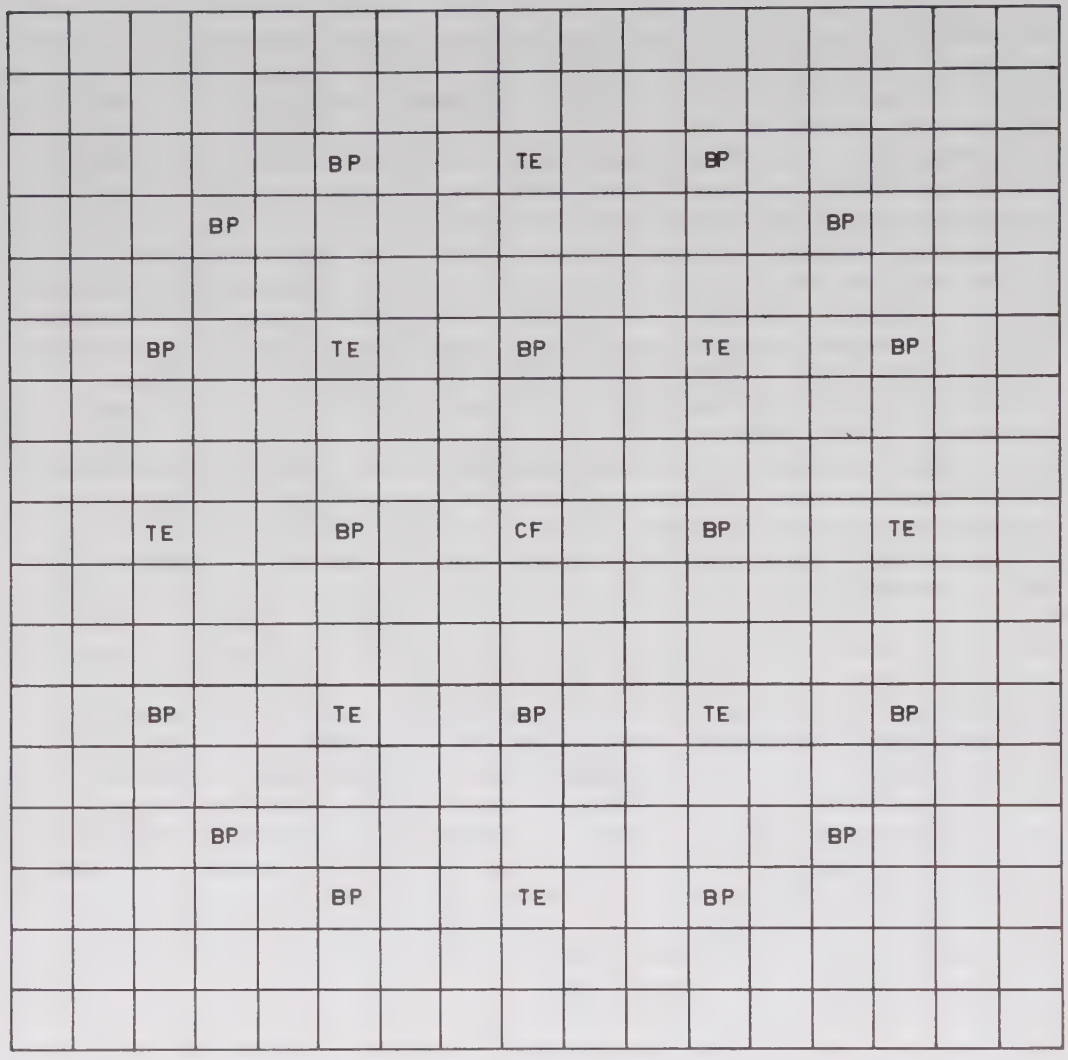
CF Cellule contenant la chambre à fission

TE Cellule "trou d'eau"

BP Cellule contenant un barreau de pyrex (poison consommable)

Cellule combustible

Fig. 1_4 : Localisation du poison consommable dans un assemblage à 12 barreaux de pyrex.



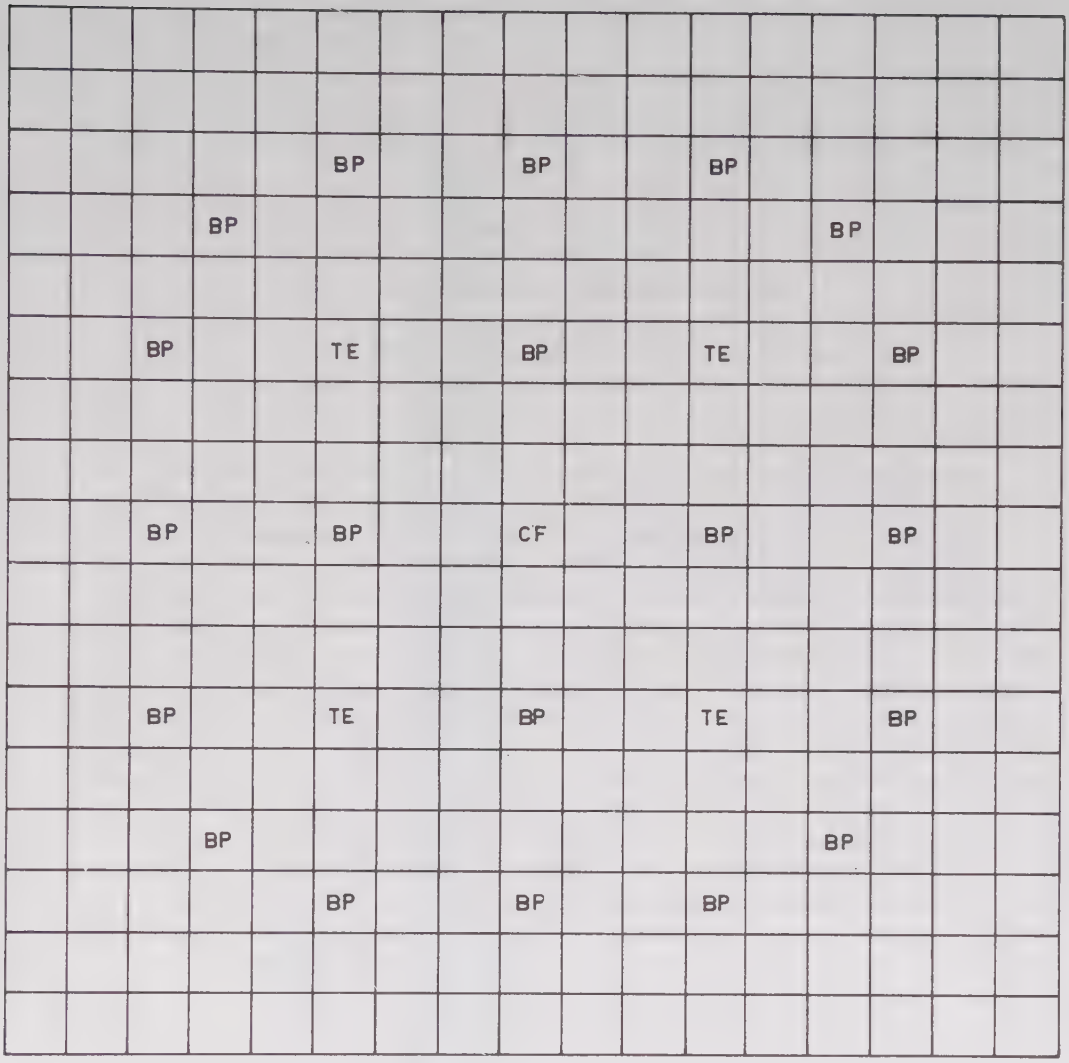
CF — Cellule contenant la chambre à fission

TE — Cellule "trou d'eau"

BP — Cellule contenant un barreau de pyrex (poison consommable)

Cellule combustible

Fig. 1_5 : Localisation du poison consommable dans un assemblage à 16 barreaux de pyrex.



CF — Cellule contenant la chambre à fission

TE — Cellule "trou d'eau"

BP — Cellule contenant un barreau de pyrex (poison consommable)

Cellule combustible

Fig. 1.6 : Localisation du poison consommable dans un assemblage à 20 barreaux de pyrex.

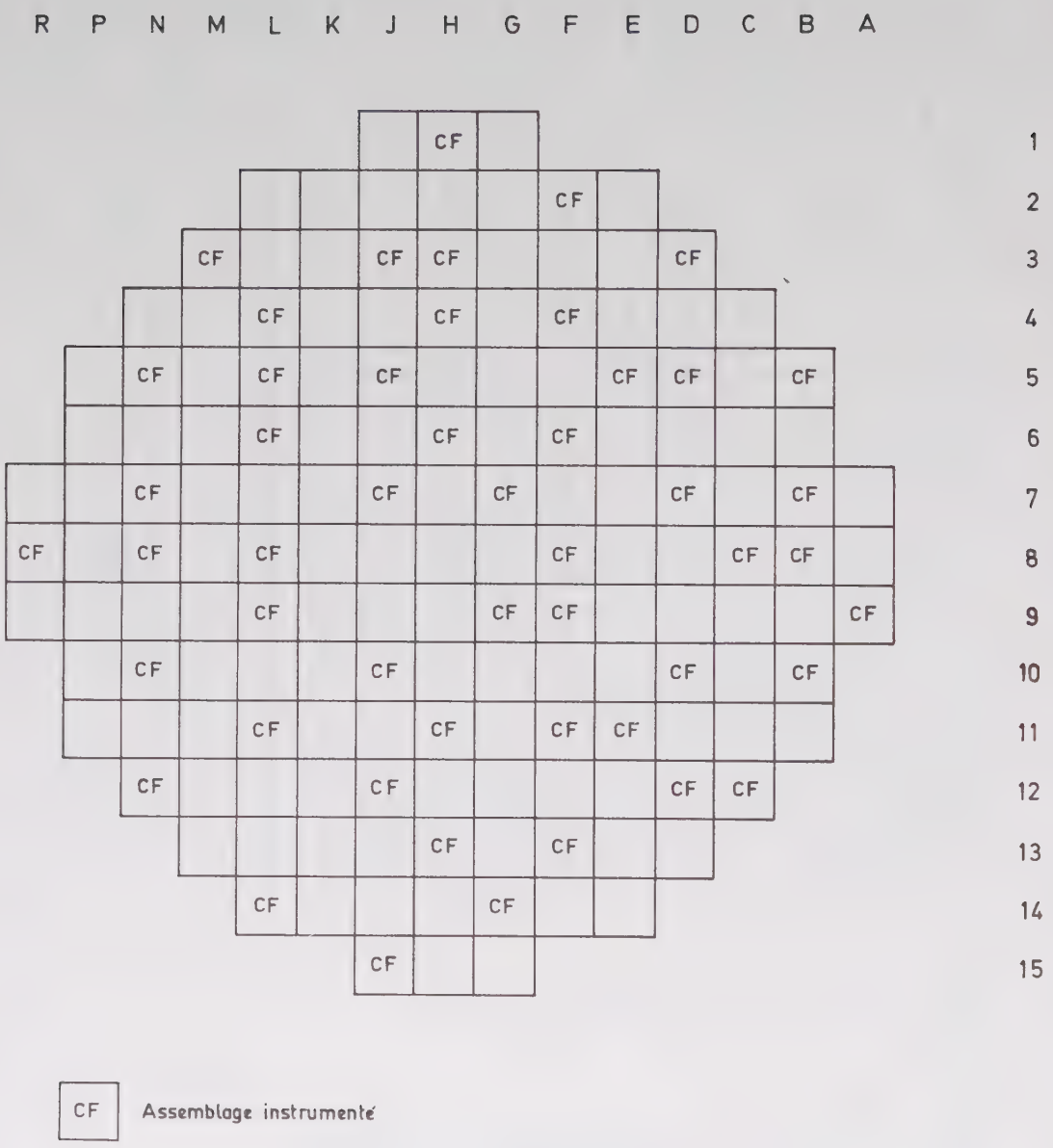


Fig. 1.7 : Répartition des assemblages recevant la chambre à fission.

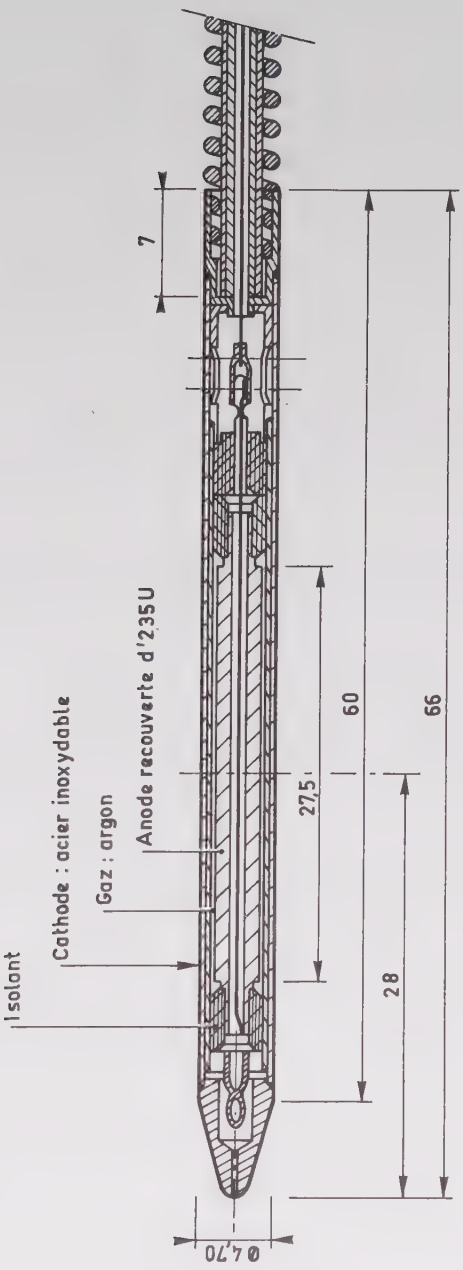


Fig. 1_8 : Chambre à fission

CHAPITRE II

APERÇUS GÉNÉRAUX SUR LE SCHÉMA DE CALCUL

II.1. - INTRODUCTION

Dans ce chapitre, il sera question des différentes étapes du calcul que nous avons suivies :

- du calcul du flux fin dans chaque assemblage par le code APOLLO,
- de l'équivalence transport-diffusion par le programme EQUIPAGE,
- de la paramètrisation des sections efficaces en fonction du taux d'irradiation VELPO,
- de la prise en compte des contre-réactions par PARASITE,
- du calcul coeur DIANE.

Les résultats de certaines étapes en particulier PARASITE, VELPO, DIANE seront présentés aux chapitres qui suivent.

L'équation de transport qui permet de calculer le flux dans chaque milieu de coeur et pour plusieurs groupes d'énergie ne peut être appliquée à l'étude du coeur complet à cause de sa complexité. On calcule la distribution du flux à l'aide de l'équation de la diffusion, moins précise que la première, mais le calcul est moins onéreux. Son application directe serait difficile, avec une représentation explicite de tous les milieux, mais il est possible de l'utiliser à condition d'homogénéiser les cellules. La représentation explicite des cellules est réalisée au niveau de la résolution de l'équation de transport par APOLLO qui fournit les constantes homogénéisées sur les cellules.

Les calculs de coeur de Fessenheim sont envisagés en utilisant le code DIANE résolvant l'équation de la diffusion par la méthode des différences finies (à deux dimensions) sur un maillage fin crayon par crayon. Les effets à 3 dimensions ne sont pas pris en compte mais ont été analysés dans d'autres travaux [6]

II.2. - REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN ASSEMBLAGE POUR LE CALCUL A DEUX DIMENSIONS

Les grilles ne seront pas représentées explicitement, mais homogénéisées sur toute la hauteur de l'assemblage. Les effets radiaux et axiaux sont séparés pour le calcul de flux. Chaque assemblage est décomposé radialement en cellules carrées au pas de 1,26 cm ayant une hauteur de 1 cm. Les cellules peuvent être des cellules combustible , des cellules "trou d'eau" et éventuellement des cellules de poisons consommables si l'assemblage contient des barreaux de pyrex. Les grappes de contrôle sont supposées non insérées.

- Les cellules sans combustible constituent des hétérogénéités. Pour tenir compte de la perturbation du spectre sur les cellules combustibles avoisinantes celles-ci sont différentiées selon la position géométrique par rapport aux hétérogénéités (cellules trou d'eau, cellules de poisons consommables).

- Cellules combustible latérales aux hétérogénéités.
- Cellules combustible situées en diagonale.
- Cellules combustible asymptotiques appelées aussi périphériques qui sont loin des hétérogénéités et occupent le périmètre de l'assemblage.

- Les cellules "coin" sont situées au coin de l'assemblage et font tampon entre les cellules périphériques et les autres cellules combustible.
- La demie lame d'eau inter-assemblage vient augmenter le volume d'eau des cellules combustible périphériques, ce qui conduit à les distinguer des autres types de cellules.

Ainsi dans les assemblages sans poison, il y a 5 types de cellules dont 4 sont des cellules combustible ; dans les assemblages avec poison, quelque soit leur nombre, il y a 8 types de cellules dont 6 sont des cellules combustible. Les figures 2.1. et 2.2. schématisent les différentes situations des cellules dans les deux cas d'un assemblage avec et sans poison. Un type de cellule sera appelé une composition.

Remarque :

La cellule "trou d'eau" centrale sera démunie de la chambre à fission provisoirement pour le calcul des constantes neutroniques de chaque assemblage.

Les constantes neutroniques équivalentes d'une cellule ou d'un groupe de cellules pour un calcul de diffusion sont fournies au préalable par un calcul APOLLO, c'est l'objet de la représentation multicellule donnée dans le paragraphe précédent.

II.3. - APOLLO

Le code APOLLO [1] résout l'équation intégrale du transport par la méthode des probabilités de collision donnant le flux dépendant de l'espace (à une ou deux dimensions) et de l'énergie dans l'approximation multigroupe (99 groupes d'énergie dont 47 dans le domaine thermique).

L'édition APOLLO prévue pour un calcul de diffusion consiste en l'homogénéisation de chaque type de cellule, les constantes neutroniques étant moyennées sur le volume de la cellule et sur deux ou quatre macro-groupes d'énergie :

- 2 macro-groupes 10 MeV - 0,625 eV.
- 4 macro-groupes 10 MeV - 907 KeV - 5 KeV - 0,625 eV

où le dernier point correspond à la coupure thermique.

Le nombre de noyaux en évolution pour l'ensemble des cellules constituant chaque assemblage est obtenu à l'aide d'APOLLO. L'évolution des noyaux lourds est faite avec un titre en bore égal à 600 ppm dans les conditions nominales de fonctionnement, à chaud pleine puissance, les températures moyennes du coeur :

- Température du modérateur T_m^* = 306°C
- Température du combustible T_c^* = 650°C (température effective)

Le flux est homogénéisé sur chaque type de cellule , à chaque pas d'évolution en condensant sur le nombre de macro-groupes.

II.4. - EQUIPAGE

Pour un réseau de cellules contenant des hétérogénéités telles que les cellules "trou d'eau" ou cellules des poisons consommables, la théorie de la diffusion n'est pas valable au voisinage des hétérogénéités locales. On est conduit à procéder à l'équivalence Transport-Diffusion. Cette équivalence ou plutôt un ajustement dans notre cas est réalisé par le programme EQUIPAGE [2] qui résout l'équation de la diffusion aux différences finies dans le but de conserver les taux de réaction dans les hétérogénéités en ajustant les sections efficaces.

$$\Sigma_{effective} \times \Phi_{Diffusion} = \Sigma_{Apollo} \times \Phi_{Apollo}$$

où Σ est la section efficace et Φ le flux dans l'hétérogénéité.

II.5. - REPRESENTATION DES SECTIONS EFFICACES POUR LE CALCUL DE DIFFUSION

Pour un calcul de diffusion-évolution tenant compte des contre-réactions (effets de températures locales), les sections effectives sont introduites dans DIANE (voir II.8) sous forme de produits de trois fonctions à variables indépendantes.

$$\sigma^{ik}_{rg}(\tau, T_m, T_c) = \sigma^{ik}_{rg}(\tau) \times \pi^{ik}_{rg}(NH_2O) \times \pi^{ik}_{rg}(P/P*) \qquad (1)$$

où σ^{ik}_{rg} est la valeur de la section de l'isotope i dans la composition k. Cette section concerne la réaction r (absorption, fission...) dans le groupe g.

$\sigma(\tau)$ est la valeur de la section à l'instant τ de la vie du réacteur, pour les valeurs T^*_m et T^*_c.

$$\pi(NH_2O) = \sigma(\tau o, T_m, T^*_c) \;/\; \sigma(\tau o, T^*_m, T^*_c)$$

$$\pi(P/p*) = \sigma(\tau o, T^*_m, T_c) \;/\; \sigma(\tau o, T^*_m, T^*_c)$$

T_m et T_c sont les températures du modérateur et du combustible.

τo est la valeur d'un taux d'irradiation quelconque. Ici la notation "étoile" indique que la grandeur considérée est une grandeur de référence.

$\pi(NH_2O)$ est un polynôme dont l'argument est le nombre de noyaux d'eau par centimètre cube à la température T_m.

$\pi(NH_2O)$ permet d'apporter une correction à la fonction $\sigma(\tau)$ en tenant compte de l'effet de densité d'eau.

$\pi(P/P*)$ est un polynôme dont l'argument est le rapport de la puissance spécifique locale P à la puissance spécifique de référence P^*. P et P^* sont exprimées en watt/cm^3. $\pi(P/P*)$ contribue à la correction de $\sigma(\tau)$ en fonction de la température du combustible (effet Doppler).

II.6. - VELPO

Le code DIANE permet de faire le calcul d'évolution. Pour chaque cellule d'assemblage, à chaque taux de combustion, il détermine le nombre de noyaux des isotopes évoluants et les sections efficaces correspondantes. Ces dernières sont introduites en donnée comme coefficients d'un polynôme ou fraction rationnelle $\sigma(\tau)$ dont l'argument est de la forme $N(t)/N(o)$ où $N(t)$ est le nombre de noyaux d'un corps compteur de l'usure du combustible à un instant t et $N(o)$ le nombre de noyaux de ce même corps à l'instant initial.

Cette paramétrisation est effectuée par la méthode des moindres carrées à l'aide du programme d'interface VELPO /3/.

Un exemple sur la précision obtenue par VELPO est donné dans le tableau 4.1.

II.7. - PARASITE

En outre DIANE peut tenir compte des effets de températures (effets modérateur et Doppler) spécifiques pour chaque cellule. PARASITE /4/ est un programme d'interface entre APOLLO et DIANE, permettant le lissage des sections en fonction de la densité d'eau, et de la température du combustible. Le code PARASITE sera plus détaillé et sa validité est étudiée dans le chapitre qui suit.

II.8. - SCHEMA DE CALCUL DIANE

DIANE /5/ est un code qui fait partie du système NEPTUNE pour les calculs de réacteur. Il résout l'équation de la diffusion par la méthode des différences finies ; c'est une version à une ou deux dimensions (X, Y) du module ICARE (trois dimensions (X, Y, Z)).

DIANE permet de résoudre l'équation de la diffusion dans un découpage fin en espace à raison d'une maille par cellule et à quatre macro-groupes d'énergie. Si le coeur présente une symétrie dans la géométrie, elle peut être utilisée dans le calcul DIANE et ainsi le coût du calcul est réduit.

II.8.1. - ACTIVATION DES CONTRE-REACTIONS

On rappelle que "l'activation des contre-réactions" dans DIANE consiste à calculer $\pi(NH_2O)$ et $\pi(P/P*)$.

Avant tout calcul de contre-réaction, un calcul préliminaire de diffusion sans corrections des sections efficaces est effectué. Ce calcul de diffusion est nécessaire à DIANE dans le but d'obtenir une distribution de puissances spécifiques P(X, Y) de chaque maille.

II.8.2. - ACTIVATION DE L'EFFET MODERATEUR

L'activation de l'effet modérateur s'effectue en calculant successivement l'enthalpie locale H(X, Y) de l'eau, la densité $\rho_{H_2O}(X, Y)$ et la concentration NH_2O :

- L'enthalpie locale, en utilisant le modèle du canal fermé à pour expression :

$$H(x, Y) = H_o + A \times P (X, Y)$$

A : coefficient reliant l'accroissement d'enthalpie du modérateur à la puissance spécifique de la maille.

H_o : valeur d'enthalpie de l'eau à l'entrée du coeur.

- La densité de l'eau ρ_{H_2O} (X, Y) est une fonction polynôminale de H(X, Y)

$$\rho_{H_2O}(X, Y) = f (H(X, Y))$$

- Par l'intermédiaire d'un coefficient d'homogénéisation C_k spécifique pour chaque type de cellule, DIANE retrouve la concentration $N_{H_2O}(X,Y)$

$$N_{H_2O}(X,Y) = C_k \rho_{H_2O}(X,Y)$$

II.8.3. - ACTIVATION DE L'EFFET DOPPLER

L'application directe du rapport P/P* permet de calculer le facteur $\pi(P/P^*)$

Remarque : L'activation peut concerner les deux effets comme elle peut concerner que l'un d'eux.

II.8.4. - CALCUL DE DIFFUSION EN CONTRE-REACTION

Un calcul de diffusion dont les sections macroscopiques ont été corrigées par les effets précités, achève la phase d'activation et fournit une nouvelle distribution de puissance.

Par des itérations successives, les corrections sont améliorées jusqu'à ce que la précision relative sur la distribution de puissance soit atteinte.

Le calcul des contre-réactions étant l'objet de notre étude, nous nous sommes donc attachés dans un premier temps à déterminer quelles sont les sections efficaces les plus sensibles aux effets de températures. Le chapitre suivant est consacré à cette étude.

								5	5	5	5	5	5	5	5	5
								2	3	3	2	3	4	4	4	5
					TE			TE	2	2	TE	2	2	3	4	5
			TE					2	3	3	2	3	TE	2	4	5
								2	3	3	2	3	3	2	3	5
		TE			TE			TE	2	2	TE	2	2	TE	2	5
								2	3	3	2	3	3	2	3	5
								2	3	3	2	3	3	2	3	5
		TE			TE			TE	2	2	TE	2	2	TE	2	5
		TE			TE			TE			TE			TE		
			TE										TE			
					TE			TE			TE					

TE Cellule "trou d'eau "

Fig. 2_1: Les différents types de cellules combustible dans un assemblage sans poison.

								8	8	8	8	8	8	8	8	8
								4	6	5	3	5	7	7	7	8
					BP			TE	4	3	BP	3	4	6	7	8
			TE					4	6	5	3	4	TE	4	7	8
								3	5	6	4	6	4	3	5	8
		BP			TE			BP	3	4	TE	4	3	BP	3	8
								3	5	6	4	6	5	3	5	8
								4	6	5	3	5	6	4	6	8
		TE			BP			TE	4	3	BP	3	4	TE	4	8
		BP			TE			BP			TE			BP		
			TE										TE			
					BP			TE			BP					

TE — Cellule "trou d'eau"

BP — Cellule poison

Fig. 2_2 : Différents types de cellules combustible dans un assemblage contenant du poison consommable.

CHAPITRE III

ETUDES DE SENSIBILITES DES SECTIONS EFFICACES AUX EFFETS DE PUISSANCE

A - *RECHERCHE DES SECTIONS EFFICACES SENSIBLES AUX EFFETS DE PUISSANCE*

B - *PRESENTATION DU PROGRAMME D'INTERFACE PARASITE*

C - *COMPARAISONS DES RESULTATS RELATIFS A DES AJUSTEMENTS OBTENUS AVEC DIFFERENTES PRECISIONS*

A - RECHERCHE DES SECTIONS EFFICACES SENSIBLES AUX EFFETS DE PUISSANCE

A.1. - INTRODUCTION

L'utilisation de bibliothèques évolutives, aux conditions nominales moyennes de fonctionnement induit une erreur sur la distribution de puissance et la réactivité (effet de redistribution de puissance). On peut prendre en compte les effets de puissance, en tabulant les sections efficaces à chaque taux d'irradiation en fonction des températures du modérateur T_m et du combustible T_c. Les sections sont paramétrées en fonction de grandeurs caractéristiques de T_m et T_c (enthalpie locale et puissance volumique par exemple). Le nombre de calculs de transport APOLLO nécessaire à l'établissement de ces bibliothèques à variation est important.

En première partie, nous verrons comment simplifier les calculs des effets de puissance en réduisant au minimum nécessaire le nombre de bibliothèques à contre-réaction sans perte de précision. Ceci est réalisé grâce à l'expression même de la section efficace utilisée dans DIANE :

$\sigma(\tau) \times \pi(NH_2O) \times \pi(P/P^*)$ (voir II.5).

sous la forme de produits de trois fonctions indépendantes où l'on suppose la séparabilité des effets de leurs arguments. $\pi(NH_2O)$, $\pi(P/P^*)$ étant respectivement des corrections (de la valeur de la section $\sigma(\tau)$ à l'irradiation τ) dues à l'effet de densité du modérateur et de la température combustible. Le problème qu'on se propose de résoudre est de déterminer quelles sont les section $\sigma(\tau)$ qui doivent être affectées par l'une des corrections et éventuellement les deux.

L'influence des effets de température sur les sections a été analysée sur une cellule appartenant à différents types d'assemblage.

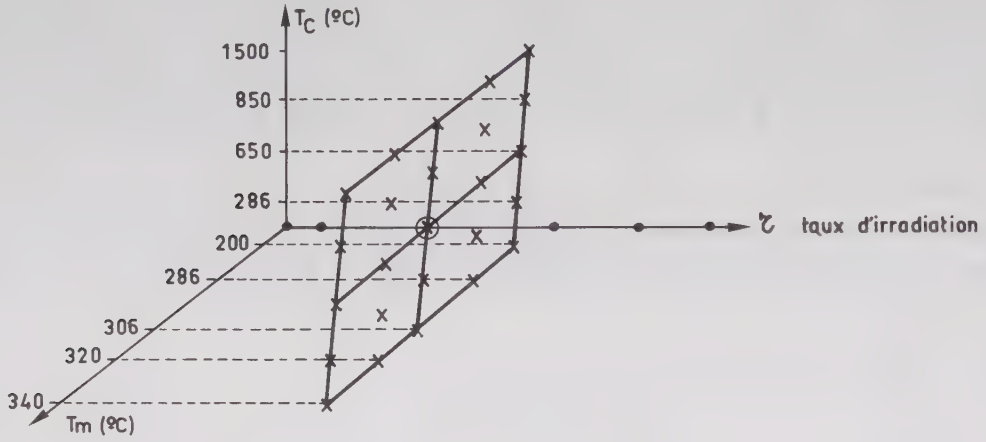
Les fonctions $\pi(NH_2O)$ et $\pi(P/P^*)$ seront des polynômes de degré 1, 2 ou 3 ; cette représentation simple est privilégiée par deux facteurs : un coût de calcul minimum et une approche suffisante de la précision cherchée. Afin de réduire le degré de ces polynômes une analyse de son influence sur la précision vient compléter cette partie.

Le programme PARASITE a été écrit afin de calculer les coefficients polynomiaux de $\pi(NH_2O)$ et de $\pi(P/P^*)$ pour le code de diffusion aux différences finies.

Le concept de calcul est détaillé en fin de chapitre avec un exemple de résultats obtenus sur l'assemblage enrichi à 3.1% pour différentes précisions sur la réactivité.

A.2. - SIMPLIFICATION DES CONTRE-REACTIONS

Si l'on désire explorer des domaines de températures du modérateur T_m = (200 - 286 - 306 - 320 - 340°C) et du combustible T_c = (200 - 286 - 650 - 850 - 1500°C) à chaque taux d'irradiation il faut constituer une matrice de sections efficaces 5 x 5, soit 25 fois le nombre de pas d'évolution comme il est illustré dans le schéma suivant :



Deux approximations peuvent être faites en vue de simplifier le schéma de calcul des contre-réactions afin de réduire le nombre de bibliothèques contre-réactives sans perte significative de précision.

A.2.1. - Taux d'irradiation

On peut supposer les variations $(\frac{\Delta\sigma}{\sigma})$ des sections efficaces en fonction de la température, indépendantes de l'irradiation et imposer à tout moment de l'évolution, les écarts calculés à une irradiation moyenne.

C'est à 12000 MWJ/T (mi-cycle) que les bibliothèques contre-réactives APOLLO seront à priori effectuées ; la proportion de Plutonium est estimée suffisante pour que le spectre en soit affecté et n'évolue plus significativement dans la suite de l'évolution.

A.2.2. - Découplage des effets de températures

Tout élément de la matrice ci-dessus qui fait intervenir des températures du modérateur T_m et du combustible T_c autres que celles des conditions nominales (T_m^* = 360°C, T_c^* = 650°C) sera calculé par la superposition des effets simultanés :

- de l'effet modérateur à T_m, la température du combustible étant fixée à T_c^*,
- de l'effet Doppler à T_c, la température du modérateur étant fixée à T_m^*.

Ce découplage nous permet de réaliser le jeu de sections efficaces de n'importe quel couple de températures (T_m, T_c) dans les limites de températures imposées ci-dessus qui encadrent celles prévues dans le cycle du coeur.

Une réduction importante est ainsi permise sur le nombre de calculs APOLLO : à un taux d'irradiation donné 9 calculs au lieu de 25. C'est ainsi que l'expression avec variables séparées correspond au souci de n'explorer que la croix et pas toute la matrice. (Voir schéma ci-dessus).

$$\sigma(\tau, T_m, T_c) = \sigma(\tau) * (NH_2O) * \pi(P/P*) \qquad (1)$$

Cette formulation suppose l'existence d'une relation bijective entre la température du combustible T_c et le rapport des puissances spécifiques P/P*. Nous reviendrons sur ce sujet concernant l'équivalence entre la température T_c et P/P* dans le chapitre qui suit.

A.3. - PRESENTATION D'UNE BIBLIOTHEQUE

Pour chaque assemblage, il existe des bibliothèques de sections efficaces microscopiques relatives aux différentes cellules, aux différents taux de combustion et températures modérateur et combustible envisagés. Chacune des bibliothèques comprend les isotopes explicites suivants :

- l'eau, le bore et le corps réceptacle 10, celui-ci désigne l'ensemble des corps non évoluants, leurs représentations explicites ne présentant pas d'intérêt particulier ;

- les isotopes évoluants tels que : Uranium 235 (^{235}U), Uranium 238 (^{238}U), Uranium 236 (^{236}U), Plutonium 239 (^{239}Pu), Plutonium 240 (^{240}Pu), Plutonium 241 (^{241}Pu), Plutonium 242 (^{242}Pu), Xénon 135 (^{135}Xe), Samarium 149 (^{149}Sm) et un isotope représentant l'ensemble des produits de fission,

- les concentrations de tous ces isotopes sont exprimées en nombre de noyaux par centimètre cube de la cellule.

La cellule combustible comprend cinq noyaux fissiles : ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu et ^{242}Pu.

Les sections effectives sont homogénéisées dans toute la cellule.

Le "corps 10" regroupe toutes les sections macroscopiques d'absorption de la structure de la cellule, les sections de transfert de tous ses constituants et les coefficients de diffusion.

Pour l'étude des contre-réactions et dans le but de réduire le coût du calcul, on est conduit à limiter le nombre de sections à paramètrer en recherchant celles qui sont les plus influencées par l'effet de densité de l'eau et l'effet Doppler, ces deux effets sont ici considérés comme découplés.

A.4. - CALCUL DU FACTEUR DE MULTIPLICATION EN MILIEU INFINI

La formule du facteur de multiplication à quatre groupes d'énergie en milieu infini sera utilisée dans ce chapitre. Pour un milieu multiplicateur, homogène en régime permanent, l'équation de diffusion à quatre groupes s'écrit :

$$(\Sigma_{ag} + \Sigma_{Rg\to g+1})\,\Phi_g = \frac{\chi^g}{\lambda} \sum_{g=1}^{g=4} \nu^g\ \Sigma_{fg}\ \Phi_g + \Sigma_{Rg-1\to g}\ \Phi_{g-1}$$

où g est un indice de groupe $\{1,2,3,4\}$

Σ_{ag} est une section efficace macroscopique d'absorption dans le groupe g

Σ_{fg} est une section efficace macroscopique de fission dans le groupe g

$\Sigma_{Rg\to g+1}$ est une section efficace macroscopique de transfert du groupe g au groupe g+1

Φ_g est le flux dans le groupe g.

ν^g est le nombre moyen de neutrons émis par fission dans le groupe g

χ^g est le spectre de fission dans le groupe g

λ est le facteur de multiplication (qu'on note $k\infty$)

L'élimination des flux Φ^g conduit à l'expression du $k\infty$:

$$k\infty = \chi^1\left(\frac{\nu\Sigma_{f1}}{\Sigma_{a_1}+\Sigma_{R_{1\to2}}} + \frac{\Sigma_{R1\to2}}{\Sigma_{a_1}+\Sigma_{R_{1\to2}}}\left(\frac{\nu\Sigma_{f2}}{\Sigma_{a_2}+\Sigma_{R_{2\to3}}} + \frac{\Sigma_{R2\to3}}{\Sigma_{a_2}+\Sigma_{R2\to3}}\left(\frac{\nu\Sigma_{f3}}{\Sigma_{a_3}+\Sigma_{R_{3\to4}}} \quad \frac{\Sigma_{R3\to4}}{\Sigma_{a_3}+\Sigma_{R_{3\to4}}} \quad \frac{\nu\Sigma_{f4}}{\Sigma_{a_4}}\right)\right)\right)$$

$$+ \chi^2\left(\frac{\nu\Sigma_{f2}}{\Sigma_{a_2}+\Sigma_{R_{2\to3}}} + \frac{\Sigma_{R2\to3}}{\Sigma_{a_2}+\Sigma_{R_{2\to3}}}\left(\frac{\nu\Sigma_{f3}}{\Sigma_{a_3}+\Sigma_{R_{3\to4}}} + \frac{\Sigma_{R3\to4}}{\Sigma_{a_3}+\Sigma_{R_{3\to4}}} \quad \frac{\nu\Sigma_{f4}}{\Sigma_{a_4}}\right)\right) \qquad (2)$$

$$+ \chi^3\left(\frac{\nu\Sigma_{f3}}{\Sigma_{a_3}+\Sigma_{R_{3\to4}}} + \frac{\Sigma_{R3\to4}}{\Sigma_{a_3}+\Sigma_{R_{3\to4}}} \quad \frac{\nu\Sigma_{f4}}{\Sigma_{a_4}}\right)$$

$$+ \chi^4 \quad \nu\Sigma_{f4}/\Sigma_{a_4}$$

A.5. - CHOIX DE LA CELLULE COMBUSTIBLE

La cellule se trouvant à la périphérie de l'assemblage a été retenue pour cette étude ; ce choix est motivé par le fait que cette cellule se trouve loin des hétérogénéités (voir figures 2.1. et 2.2.) causées soit par une cellule trou d'eau soit par la présence d'un poison consommable.

A.6. - SENSIBILITE DES SECTIONS AUX EFFETS DE TEMPERATURES

A.6.1. - Assemblage sans poison

A.6.1.1. - Effet modérateur

La température du combustible est maintenue constante à $T_c^* = 650°C$. Pour chercher les sections sensibles à l'effet modérateur et pour illustrer les opérations, la cellule périphérique de l'assemblage enrichi à 3.1% sans poison est prise comme exemple entre les températures $T_m = 286°C$ et $T_m^* = 306°C$ auxquelles correspondent deux bibliothèques A et B :

$$A\,(T_m = 286°C,\ T_c^*) = \{\sigma^{235}_{a1A}U,\ \sigma^{235}_{a2A}U \ \ldots\ \sigma^{235}_{f4A}U,\ \ldots\ \sigma^{k}_{rgA}\ldots,\ \Sigma^{10}_{R1\to 2A},\ \Sigma^{10}_{R2\to 3A},\ \Sigma^{10}_{R3\to 4A}\}$$

$$B\,(T_m^*,\ T_c^*) = \{\sigma^{235}_{a1B}U,\ \sigma^{235}_{a2B}U,\ldots\ \sigma^{235}_{f4B}U,\ \ldots\sigma^{k}_{rgB}\ldots,\ \Sigma^{10}_{R1\to 2A},\ \Sigma^{10}_{R2\to 3B},\ \Sigma^{10}_{R3\to 4B}\}$$

où σ, Σ = section efficace.

r = absorption (a), fission (f), transfert en énergie $g \to g+1$ (R)

g = groupe d'énergie de 1 à 4

k = isotope (^{235}U, ^{238}U, ^{236}U, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu, ^{135}Xe, ^{147}Sm, eau, bore soluble, produits de fission, corps 10).

L'application de la formule (2) conduit aux valeurs suivantes du k^∞ :

$k^A_\infty = 1.07307$ et $k^B_\infty = 1.06734$

soit un écart de 535 pcm[1] sur la réactivité dû à l'effet de température de modérateur.

[1] $\left(\text{Log}\ \frac{K^A_\infty}{K^B_\infty}\right) \times 10^{+5}$ écart relatif en pcm noté aussi $\Delta K^\infty/K^\infty$

On désire repérer toutes les sections sensibles à l'effet modérateur ce qui nécessite autant de calculs de k∞, qu'il y a de sections dans la bibliothèque (73 sections efficaces, celles de transport étant exclues). Pour chaque calcul du k∞ nous substituons une section $\sigma^{k}_{r,g,B}$ de réaction r dans le groupe g du corps k de la bibliothèque B à une section $\sigma^{k}_{r,g,A}$ de la bibliothéque A. La nouvelle valeur du k∞ est comparée à celle du k^{A}_{∞} où toutes les sections sont à T_m = 286°C, l'écart est noté ΔK∞/K∞.

La même manière de procéder est utilisée aux autres états de températures 200, 320 et 340°C du modérateur où seules les sectionsd'une bibliothèque à la température $T_m \neq 306$°C sont remplacées successivement par celles de la bibliothèque B qui servent de référence.

Dans le tableau 3.1. sont reportées les valeurs des sections de toutes les réactions et de tous les corps dans les conditions nominales qui sont issues d'un calcul APOLLO, ainsi que les variations relatives de ces sections ($/\bar{\sigma}(T_m, 650) - \sigma(306,650) / \sigma(305,650_\bar{/} * 10^{+5}$) en fonction de la température du modérateur avec les écarts sur la réactivité correspondants calculés à partir de la formule du k∞.

a) Discussion

La sensibilité d'une section à la variation de la température ne constitue pas à elle seule le critère de choix, comme on peut le constater sur l'exemple suivant :

A T_m = 200°C il y a une variation de 6,1% sur la section d'absorption de ^{242}Pu sans aucun effet sur la réactivité, alors que pour l'isotope ^{239}Pu, la section n'a varié que de 4,7% et induit un effet important sur la réactivité égal à 1018 pcm. Ceci s'explique par le fait que le taux de réaction du ^{239}Pu est plus important que celui du ^{242}Pu. Il en serait autrement si l'on raisonnait sur la section macroscopique de l'isotope ; mais l'expression (1) rend cette pratique difficile. Il est donc raisonnable dans notre cas de qualifier la sensibilité d'une section à l'effet d'une variation de température par son effet induit sur la réactivité globale.

Le problème est de savoir à partir de quel écart relatif sur la réactivité ΔK∞/K∞ induit, on doit prendre en considération la section modifiée. Il n'existe pas de réponse unique à cette question ; tout dépend de la précision qu'on souhaite obtenir sur la réactivité. A titre d'illustration, limiter l'ajustement des sections efficaces en fonction des effets de température à celles qui sans correction induiraient dans le bilan de réactivité une erreur supérieure à 10 pcm, conduit à une erreur résiduelle de 14 pcm environ (somme algébrique de contributions inférieures à 10 pcm), cet écart de 14 pcm est calculé par rapport à k^{B}_{∞} à T_m = 286°C ; rappelons que l'effet entre T_m = 286°C et T^{*}_m s'élève à 535 pcm. Les effets individuels de chaque section se compensent mutuellement, cet écart pourrait cependant augmenter si le critère imposé est supérieur à 10 pcm.

TABLEAU 3.1. - EFFET MODERATEUR

Cellule périphérique de l'assemblage 3.1% SP, 12000 MWJ/T
600 ppm de bore

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à T_M^* = 306°C T_C^* = 650°C	T_M = 200°C K∞ = 1.08403		T_M = 286°C K∞ = 1.07307		T_M = 320°C K∞ = 1.06201		T_M = 340°C K∞ = 1.04907	
			Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞
^{235}U	σ a 1	0.13326 E+01	765	1	195	0	- 158	0	- 473	- 1
	σ a 2	0.22104 E+01	113	0	23	0	- 18	0	- 36	0
	σ a 3	0.35802 E+02	1226	62	352	20	- 304	- 19	- 986	- 65
	σ a 4	0.30007 E+03	8468	2678	1653	520	-1183	- 368	-3226	- 989
	σ f 1	0.12928 E+01	781	- 3	201	- 1	- 162	1	- 487	3
	σ f 2	0.17567 E+01	159	- 1	40	0	- 23	0	- 68	1
	σ f 3	0.23315 E+02	1201	- 91	347	- 30	- 300	28	- 978	100
	σ f 4	0.25527 E+03	8665	- 3999	1688	- 782	-1207	553	-3291	1487
^{238}U	σ a 1	0.48105 E+00	998	32	262	9	- 214	- 8	- 653	- 26
	σ a 2	0.25357 E+00	272	6	67	2	- 51	- 1	- 138	- 4
	σ a 3	0.22581 E+01	3467	541	965	168	- 819	- 153	-2586	- 517
	σ a 4	0.13286 E+01	7105	468	1400	94	-1001	- 67	-2732	- 181
	σ f 1	0.42375 E+00	1086	- 77	286	- 23	- 236	20	- 720	66
	σ f 2	0.67187 E-03	1423	0	393	0	- 338	0	-1070	0
^{236}U	σ a 1	0.27538 E+00	1765	0	483	0	- 403	0	-1264	0
	σ a 2	0.47932 E+00	198	0	48	0	- 35	0	- 102	0
	σ a 3	0.26268 E+02	2623	10	739	3	- 636	- 3	-2033	- 10
	σ a 4	0.29604 E+01	7144	2	1412	0	-1010	0	-2760	- 1
^{239}Pu	σ a 1	0.19326 E+01	771	0	197	0	- 160	0	- 481	0
	σ a 2	0.20054 E+01	284	0	70	0	- 55	0	- 170	0
	σ a 3	0.40734 E+02	933	11	272	3	- 236	- 3	- 766	- 11
	σ a 4	0.10730 E+04	-4688	- 1018	-1025	- 229	736	166	1976	444
	σ f 1	0.19092 E+01	780	- 1	204	0	- 157	0	- 482	1
	σ f 2	0.16465 E+01	352	- 1	91	0	- 73	0	- 225	1
	σ f 3	0.24926 E+02	1063	- 21	309	- 7	- 269	6	- 875	23
	σ f 4	0.68970 E+03	-3378	1000	- 758	225	551	- 162	1469	- 426
^{240}Pu	σ a 1	0.16464 E+01	765	0	194	0	- 158	0	- 474	0
	σ a 2	0.75194 E+00	496	0	132	0	- 109	0	- 338	0
	σ a 3	0.49802 E+03	6301	168	1793	53	-1532	- 49	-4881	- 168
	σ a 4	0.17383 E+03	3153	21	512	3	- 322	- 2	- 754	- 5
^{241}Pu	σ a 1	0.17394 E+01	770	0	201	0	- 155	0	- 471	0
	σ a 2	0.25607 E+01	125	0	27	0	- 20	0	- 47	0
	σ a 3	0.63371 E+02	1599	2	453	1	- 390	- 1	-1250	- 2
	σ a 4	0.94529 E+03	783	13	208	3	- 194	- 3	- 682	- 11
	σ f 1	0.17299 E+01	769	0	202	0	- 156	0	- 474	0
	σ f 2	0.22688 E+01	159	0	35	0	- 26	0	- 75	0
	σ f 3	0.48736 E+02	1506	- 5	425	- 2	- 367	2	-1176	5
	σ f 4	0.66572 E+03	1712	- 43	404	- 10	- 335	8	-1071	26

Des tableaux 3.1. à 3.6., les symboles Δσ/σ, ΔK∞/K∞ et E ± N désignent :

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \left(\frac{\sigma(T)}{\sigma(T_m^*, T_c^*)} - 1 \right) \times 10^{+5} \quad \text{où } T = \begin{cases} T_M \\ \text{ou} \\ T_C \end{cases},$$

$$E \pm N = 10^{\pm N}$$

ΔK∞/K∞ est l'erreur sur la réactivité, qu'induirait la section correspondante figée dans les conditions nominales de température et lorsque toutes les autres sections sont dans un état de température du modérateur (pour l'effet du modérateur) ou du combustible (pour l'effet Doppler) non nominal.

TABLEAU 3.1. - Suite

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à T_M^* = 306°C T_C^* = 650°C	T_M = 200°C K^∞ = 1.08403		T_M = 286°C K^∞ = 1.07307		T_M = 320°C K^∞ = 1.06201		T_M = 340°C K^∞ = 1.04907	
			$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K^\infty/K^\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K^\infty/K^\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K^\infty/K^\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K^\infty/K^\infty$
^{242}Pu	σ a 1	0.16184 E+01	834	0	216	0	- 173	0	- 525	0
	σ a 2	0.46397 E+00	580	0	155	0	- 129	0	- 403	0
	σ a 3	0.87927 E+02	1933	0	558	0	- 483	0	-1564	0
	σ a 4	0.95556 E+01	6126	0	1191	0	- 847	0	-2293	0
	σ f 1	0.15826 E+01	840	0	215	0	- 177	0	- 537	0
	σ f 2	0.21273 E+00	1241	0	343	0	- 291	0	- 921	0
	σ f 3	0.97757 E-20	- 88	0	- 25	0	21	0	67	0
	σ f 4	0.92296 E-20	- 408	0	- 78	0	55	0	+ 153	0
^{135}Xe	σ a 1	0.90181 E-03	345	0	79	0	- 57	0	- 152	0
	σ a 2	0.15705 E-01	- 76	0	- 32	0	32	0	115	0
	σ a 3	0.37404 E+03	3449	0	1042	0	- 920	0	-3013	0
	σ a 4	0.14009 E+05	10929	268	2334	62	-1735	- 47	-4840	- 135
^{149}Sm	σ a 1	0.46273 E-01	277	0	61	0	- 41	0	- 102	0
	σ a 2	0.10837 E+01	- 83	0	- 37	0	37	0	120	0
	σ a 3	0.31235 E+03	3150	0	938	0	- 816	0	-2664	0
	σ a 4	0.40903 E+05	6210	37	1557	10	-1227	- 7	-3606	- 22
Eau	σ a 1	0.97826 E-02	583	1	179	0	- 165	0	- 549	- 1
	σ a 2	0.29629 E-19	- 199	0	- 51	0	44	0	128	0
	σ a 3	0.25095 E-01	2499	10	725	3	- 630	- 2	-2032	- 7
	σ a 4	0.36695 E+00	8721	384	1690	65	-1205	- 42	-3265	- 102
Bore soluble	σ a 1	0.86723 E-01	- 281	0	- 68	0	51	0	144	0
	σ a 2	0.41237 E+00	- 291	0	- 87	0	78	0	250	0
	σ a 3	0.29525 E+02	2422	12	704	3	- 613	- 3	-1975	- 9
	σ a 4	0.42435 E+03	8691	443	1685	75	-1197	- 48	-3254	- 118
Produits de fission	σ a 1	0.70654 E-02	413	0	99	0	- 72	0	- 201	0
	σ a 2	0.72394 E-01	- 51	0	- 23	0	26	0	94	0
	σ a 3	0.56073 E+01	1889	34	537	11	- 460	- 10	-1482	- 34
	σ a 4	0.9035 E+01	9262	192	1701	36	-1162	- 24	-3013	- 63
Corps 10	Σ a 1	0.21976 E-03	1384	3	382	1	- 317	- 1	- 998	- 2
	Σ a 2	0.98939 E-04	- 379	- 1	- 88	0	69	0	207	1
	Σ a 3	-0.28378 E-03	-14610	41	3766	- 12	-5587	19	22974	84
	Σ a 4	0.28129 E-02	-9095	- 182	-1701	- 35	1115	23	2617	53
	$\Sigma_{r1\to2}$	0.63484 E-01	15435	606	3927	174	-3123	- 151	-9316	- 490
	$\Sigma_{r2\to3}$	0.56327 E-01	22199	- 436	5618	- 125	-4454	108	-13247	348
	$\Sigma_{r3\to4}$	0.50137 E-01	26478	-4490	6702	-1285	-5306	1108	-15753	3570
TOTAL (pcm)				-3323		- 997		+ 868		+2813

Or ce critère imposé sur la réactivité dépend de l'écart ΔT en température par rapport à la température nominale. Certaines sections deviennent plus sensibles (relativement au critère choisi sur la réactivité) quant ΔT prend la valeur maximum : par exemple la section d'absorption épithermique de ^{236}U qui à T_m = 200°C conduit à $\Delta K\infty/K\infty$ égal à 10 pcm alors qu'à T_m = 286°C elle conduit à 3 pcm. Il est donc important de modifier ce critère de manière à ce qu'il soit indépendant de ΔT, on est ramené à l'exprimer autrement : la sensibilité de la réactivité à un effet différentiel de la température de l'isotope. Dans l'exemple ci-dessus la contribution au coefficient de température de ^{236}U prend les valeurs : 0.1 ; 0.15 ; 0.2 ; 0.29 pcm/°C aux températures 200, 286, 320, 340 °C.

Adopter une erreur absolue constante sur le coefficient de température calculé entre l'état nominal et tous les autres états de température, reviendrait à imposer sur le bilan neutronique une précision décroissante quand l'écart avec l'état nominal s'accroît. Cette façon de procéder ne garantirait pas en revanche la conservation de la même erreur absolue sur un coefficient de température mesuré entre deux états non nominaux. En pratique, la variation monotone de la plupart des sections efficaces rend équivalents les deux critères (en pcm ou en pcm/°C) : l'erreur maximale est observée aux extrémités du domaine de température et décroît progressivement pour s'annuler par hypothèse dans la situation nominale.

b) Résultats

On peut dénombrer toutes les sections sensibles à l'effet modérateur moyennant ce critère : la plupart des réactions thermiques, les réactions épithermiques des isotopes qui ont un poids important dans le bilan neutronique (section, ou concentration importante) comme ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu, ^{240}Pu et le corps 10. Dans le domaine rapide (groupe 1) seules les réactions du ^{238}U et la section de transfert au groupe 2. Soit 41% des sections sont sensibles à l'effet de densité de l'eau.

A.6.1.2. - Effet Doppler

Dans le même esprit que pour l'effet modérateur, nous avons entrepris la recherche des sections sensibles à l'effet Doppler. Les sections de référence sont celles à T_c = 650°C (bibliothèque B). La température du modérateur est supposée constante T_m^* = 306°C (tableau 3.2). Peu de sections sont sensibles à l'effet Doppler. Il est dû essentiellement aux isotopes ayant des résonances dans le domaine épithermique : ^{238}U, ^{240}Pu et le Zirconium. Seule la section de transfert épithermique est sensible à la température du combustible. L' ^{235}U et le ^{239}Pu ne contribuent que très peu à l'effet Doppler[1]. 14 sections sont sensibles si l'on obeerve le même critère ci-dessus, qui représentent 19% de l'ensemble des sections.

(1) La faible contribution de ces isotopes à l'effet Doppler concerne essentiellement les domaines thermique et épithermique, avec compensation approximative de l'absorption et de la fission.

L'ensemble de ces sections a un effet global de - 5 pcm entre les températures $T_c = 286$ et T_c^*.

Remarque : Toute section sensible à l'effet Doppler l'est aussi à l'effet de densité, mais il n'en est pas de même réciproquement.

TABLEAU 3.2. - EFFET DOPPLER

Cellule périphérique de l'assemblage 3.1% SP, 12000 MWJ/T, 600 ppm de bore

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à T^*_M = 306°C T^*_C = 650°C	T_C = 200°C $K\infty^C$ = 1.08233		T_C = 286°C $K\infty^C$ = 1.07955		T_C = 850°C $K\infty^C$ = 1.06212		T_C = 1500°C $K\infty^C$ = 1.04659	
			Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞
^{235}U	σ a 1	0.13326 E+01	30	0	22	0	- 8	0	- 45	0
	σ a 2	0.22104 E+01	- 23	0	- 18	0	9	0	36	0
	σ a 3	0.35802 E+02	455	27	388	23	- 170	- 10	- 701	- 41
	σ a 4	0.30007 E+03	17	5	17	5	- 13	- 4	- 57	- 18
	σ f 1	0.12928 E+01	23	0	23	0	- 8	0	- 39	0
	σ f 2	0.17567 E+01	- 11	0	- 11	0	11	0	34	0
	σ f 3	0.23315 E+02	425	- 38	356	- 32	- 154	14	- 622	56
	σ f 4	0.25527 E+03	20	- 9	16	- 7	- 16	7	- 59	27
^{238}U	σ a 1	0.48105 E+00	- 4	0	- 4	0	2	0	6	0
	σ a 2	0.25357 E+00	-1510	- 41	-1108	- 30	367	10	1329	36
	σ a 3	0.22581 E+01	-6133	-1110	-5062	- 916	2192	397	8946	1623
	σ a 4	0.13286 E+01	23	1	15	1	- 8	- 1	- 45	- 3
	σ f 1	0.42375 E+00	- 17	1	- 14	1	5	1	24	- 2
	σ f 2	0.67187 E-03	97	0	80	0	- 36	0	- 143	0
^{236}U	σ a 1	0.27538 E+00	- 62	0	- 51	0	22	0	91	0
	σ a 2	0.47932 E+00	- 17	0	- 15	0	8	0	33	0
	σ a 3	0.26268 E+02	461	2	411	2	- 190	- 1	- 818	- 4
	σ a 4	0.29604 E+01	17	0	17	0	- 10	0	- 51	0
^{239}Pu	σ a 1	0.19326 E+01	31	0	26	0	- 10	0	- 41	0
	σ a 2	0.20054 E+01	0	0	0	0	5	0	10	0
	σ a 3	0.40734 E+02	295	4	243	3	- 110	- 2	- 439	- 6
	σ a 4	0.10730 E+04	- 47	- 11	- 37	- 8	19	4	93	21
	σ f 1	0.19092 E+01	31	0	26	0	- 10	0	- 37	0
	σ f 2	0.16465 E+01	6	0	6	0	0	0	- 6	0
	σ f 3	0.24926 E+02	345	- 8	285	- 7	- 128	3	- 510	12
	σ f 4	0.68970 E+03	- 41	12	- 33	10	19	- 6	81	- 24
^{240}Pu	σ a 1	0.16464 E+01	30	0	24	0	- 12	0	- 43	0
	σ a 2	0.75194 E+00	- 11	0	8	0	- 3	0	- 11	0
	σ a 3	0.49802 E+03	-4283	- 134	-3241	- 102	1408	43	5034	154
	σ a 4	0.17383 E+03	- 23	0	- 17	0	6	0	29	0
^{241}Pu	σ a 1	0.17394 E+01	29	0	23	0	- 12	0	40	0
	σ a 2	0.25607 E+01	- 20	0	- 16	0	8	0	31	0
	σ a 3	0.63371 E+02	521	1	466	1	- 210	0	- 903	- 2
	σ a 4	0.94529 E+03	- 19	0	- 15	0	7	0	34	1
	σ f 1	0.17299 E+01	29	0	23	0	- 6	0	- 40	0
	σ f 2	0.22688 E+01	- 18	0	- 13	0	4	0	26	0
	σ f 3	0.48736 E+02	546	- 2	488	2	- 220	1	- 946	4
	σ f 4	0.66572 E+03	- 15	0	- 12	0	5	0	23	- 1

TABLEAU 3.2. - Suite

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à T_M^* = 306°C T_C^* = 650°C	T_C = 200°C $K\infty$ = 1.08233		T_C = 286°C $K\infty$ = 1.07955		T_C = 850°C $K\infty$ = 1.06212		T_C = 1500°C $K\infty$ = 1.04659	
			$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$
^{242}Pu	σa 1	0.16184 E+01	25	0	19	0	- 6	0	- 31	0
	σa 2	0.46397 E+00	17	0	13	0	- 4	0	- 19	0
	σa 3	0.87927 E+02	293	0	265	0	- 130	0	- 606	0
	σa 4	0.95556 E+01	15	0	14	0	- 9	0	- 43	0
	σf 1	0.15826 E+01	19	0	13	0	- 6	0	- 32	0
	σf 2	0.21273 E+00	85	0	70	0	- 28	0	- 118	0
	σf 3	0.97757 E-20	87	0	72	0	- 31	0	- 125	0
	σf 4	0.92296 E-20	- 5	0	- 4	0	1	0	4	0
^{135}Xe	σa 1	0.90181 E-03	85	0	70	0	- 31	0	- 124	0
	σa 2	0.15705 E-01	- 51	0	- 45	0	19	0	89	0
	σa 3	0.37404 E+03	805	0	660	0	- 286	0	-1085	0
	σa 4	0.14009 E+07	36	1	29	1	- 21	- 1	- 100	- 3
^{149}Sm	σa 1	0.46273 E-01	93	0	76	0	- 35	0	- 136	0
	σa 2	0.10837 E+01	- 46	0	- 46	0	18	0	92	0
	σa 3	0.31235 E+03	842	0	686	0	- 291	0	-1127	0
	σa 4	0.40903 E+05	24	0	22	0	- 17	0	- 68	0
Eau	σa 1	0.97826 E-02	- 181	0	- 148	0	65	0	267	0
	σa 2	0.29629 E-19	- 3	0	- 3	0	3	0	7	0
	σa 3	0.25095 E-01	430	2	367	1	- 159	- 1	- 658	- 3
	σa 4	0.36695 E+00	11	0	8	0	- 8	0	- 30	- 1
Bore Soluble	σa 1	0.86723 E-01	- 39	0	- 32	0	14	0	56	0
	σa 2	0.41237 E+00	- 56	0	- 48	0	22	0	87	0
	σa 3	0.29525 E+02	413	2	352	2	- 156	- 1	- 633	- 3
	σa 4	0.42435 E+03	12	0	12	0	- 5	0	- 28	- 1
Produits de fission	σa 1	0.70654 E-02	78	0	64	0	- 27	0	- 110	0
	σa 2	0.72394 E-01	- 44	0	- 39	0	19	0	79	0
	σa 3	0.56073 E+01	467	10	407	8	- 191	- 4	- 801	- 16
	σa 4	0.90635 E+01	31	1	25	0	- 15	0	- 72	- 1
Corps 10	Σ a 1	0.21976 E-03	- 121	0	- 99	0	44	0	180	0
	Σ a 2	0.98939 E-04	- 41	0	- 35	0	16	0	69	0
	Σ a 3	-0.28378 E-03	-4326	14	-3994	13	3476	- 11	15774	- 51
	Σ a 4	0.28129 E-02	-1190	- 24	-1080	- 22	837	17	3766	77
	$\Sigma_{r1\to2}$	0.63484 E-01	57	3	47	2	- 20	- 1	- 83	- 4
	$\Sigma_{r2\to3}$	0.56327 E-01	- 82	2	- 70	2	33	- 1	134	- 3
	$\Sigma_{r3\to4}$	0.50137 E-01	492	- 95	417	- 81	- 179	36	- 725	154
TOTAL (pcm)				-1384		-1133		+ 489		+1978

A.6.2. - Effets du poison et de l'enrichissement

A.6.2.1. - Effet du poison

a) Effet modérateur

Les sections sensibles à l'effet modérateur dans le cas d'un assemblage sans poison le sont aussi quand celui-ci contient des crayons empoisonnés (tableaux 3.1. et 3.3.). Cette sensibilité ne varie que très légèrement avec une tendance à augmenter $\Delta K\infty/K\infty$ en valeur absolue. Cette tendance est beaucoup ressentie au niveau de la section de transfert épithermique $\Sigma_{R3\to4}$.

b) Effet Doppler

La présence ou l'absence de poison dans l'assemblage ne modifie pas la sensibilité des sections à l'effet Doppler. On peut constater sur les tableaux (3.2. et 3.4.) que la variation relative des sections est conservée quand on passe de l'assemblage sans poison à celui avec 16 crayons empoisonnés (l'enrichissement est fixé à 3.1%). Il faut noter une légère différence de sensibilité pour le corps 10.

En fait, il est remarquable que la variation de la section d'un corps avec la température ne dépende quasiment que de la nature de la réaction et du corps et très peu de la concentration du corps et de son environnement (exemple, l'eau dans les cellules : combustible, poison et trou d'eau, ...).

A.6.2.2. - Effet d'enrichissement

a) Effet modérateur

Quand l'enrichissement passe de 2.1. à 3.1% (tableaux 3.1. et 3.5.) la sensibilité des sections à l'effet modérateur varie notablement pour tous les noyaux lourds. Ceci est lié à la différence du spectre. Les taux de réactions de l'^{235}U sont plus sensibles dans l'assemblage enrichi à 3,1 % que celui à 2,1 % (coefficients de température partiels respectifs 26 et 19 pcm/°C pour σ_{a_4}), inversement pour l'^{238}U et les isotopes du Plutonium.

Ce résultat est prévisible, le poids des sections de l'^{235}U est supérieur dans le bilan de réactivité puisque sa concentration est supérieure alors que c'est l'inverse pour les sections de Plutonium. En revanche, les variations $(\frac{\Delta\sigma}{\sigma})$ en fonction de la température sont relativement indépendantes de l'enrichissement (2,1 % - 3,1 %).

b) Effet Doppler

Les $\Delta\sigma/\sigma$ varient de moins de 2 % entre les assemblages enrichis à 2.1 et 3.1 % sans poison (tableaux 3.2 et 3.6). Les $\Delta K\infty/K\infty$ induits par ces sections dû à l'effet Doppler dépendent sensiblement de l'enrichissement.

TABLEAU 3.3. - EFFET MODERATEUR

Cellule périphérique de l'assemblage 3.1% 16 BP, 12000 MWJ/T, 600 ppm de bore

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_c^* = 650°C$	T_M = 200°C K∞ = 1.08956		T_M = 286°C K∞ = 1.07759		T_M = 320°C K∞ = 1.06592		T_M = 340°C K∞ = 1.05245	
			Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞
^{235}U	σ a 1	0.13322 E+01	766	1	195	0	- 150	0	- 465	- 1
	σ a 2	0.22151 E+01	86	0	18	0	- 9	0	- 18	0
	σ a 3	0.35761 E+02	1278	66	369	21	- 316	- 20	-1023	- 68
	σ a 4	0.29727 E+03	8666	2674	1699	520	-1218	- 368	-3330	- 992
	σ f 1	0.12924 E+01	782	- 3	201	- 1	- 155	1	- 480	3
	σ f 2	0.17598 E+01	136	- 1	28	0	- 23	0	- 57	1
	σ f 3	0.23279 E+02	1254	- 95	365	- 32	- 314	30	-1018	104
	σ f 4	0.25289 E+03	8865	-3961	1736	- 777	-1242	550	-3393	1482
^{238}U	σ a 1	0.48097 E+00	1010	32	266	9	- 216	- 8	- 659	- 26
	σ a 2	0.25430 E+00	244	6	59	2	- 43	- 1	- 114	- 4
	σ a 3	0.22582 E+01	3498	545	979	170	- 824	- 154	-2599	- 519
	σ a 4	0.13178 E+01	7255	462	1434	92	-1024	- 66	-2815	- 180
	σ f 1	0.42369 E+00	1105	- 78	293	- 23	- 238	20	- 732	67
	σ f 2	0.66777 E-03	1508	0	416	0	- 356	0	-1128	0
^{236}U	σ a 1	0.27493 E+00	1862	0	513	0	- 426	0	-1335	0
	σ a 2	0.48026 E+00	175	0	40	0	- 31	0	- 90	0
	σ a 3	0.26276 E+02	2679	10	757	3	- 647	- 3	-2078	- 10
	σ a 4	0.29361 E+01	7295	2	1448	0	-1039	0	-2844	- 1
^{239}Pu	σ a 1	0.19320 E+01	771	0	202	0	- 155	0	- 471	0
	σ a 2	0.20069 E+01	274	0	70	0	- 55	0	- 159	0
	σ a 3	0.40650 E+02	984	12	285	4	- 248	- 4	- 809	- 13
	σ a 4	0.10692 E+04	-4592	-1046	-1010	- 237	720	169	1936	454
	σ f 1	0.19087 E+01	775	- 1	199	0	- 157	0	- 477	1
	σ f 2	0.16464 E+01	352	- 1	91	0	- 73	0	- 225	1
	σ f 3	0.24870 E+02	1122	- 23	330	- 8	- 281	7	- 925	26
	σ f 4	0.68688 E+03	-3280	1009	- 740	228	537	- 164	1428	- 430
^{240}Pu	σ a 1	0.16459 E+01	752	0	194	0	- 158	0	- 468	0
	σ a 2	0.75192 E+00	499	0	132	0	- 110	0	- 340	0
	σ a 3	0.48839 E+03	6632	180	1904	58	-1581	- 52	-5074	- 178
	σ a 4	0.17355 E+03	3152	21	507	3	- 323	- 2	- 743	- 5
^{241}Pu	σ a 1	0.17390 E+01	765	0	196	0	- 155	0	- 472	0
	σ a 2	0.25654 E+01	105	0	23	0	- 12	0	- 31	0
	σ a 3	0.63362 E+02	1651	3	469	1	- 402	- 1	-1294	- 3
	σ a 4	0.93640 E+03	933	16	246	4	- 224	- 4	- 776	- 14
	σ f 1	0.17295 E+01	769	0	197	0	- 156	0	- 474	0
	σ f 2	0.22725 E+01	141	0	31	0	- 22	0	- 62	0
	σ f 3	0.48734 E+02	1551	- 6	439	- 2	- 378	2	-1215	6
	σ f 4	0.65910 E+03	1875	- 50	445	- 12	- 369	10	-1173	31

TABLEAU 3.3. - SUITE

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_C^* = 650°C$	T_M = 200°C $K\infty$ = 1.08956		T_M = 286°C $K\infty$ = 1.07759		T_M = 320°C $K\infty$ = 1.06592		T_M = 340°C $K\infty$ = 1.05245	
			$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$
^{242}Pu	σa 1	0.16178 E+01	834	0	216	0	- 173	0	- 525	0
	σa 2	0.46378 E+00	589	0	157	0	- 132	0	- 408	0
	σa 3	0.87472 E+02	1595	0	326	0	- 543	0	-1741	0
	σa 4	0.94894 E+01	6245	0	1217	0	- 868	0	-2356	0
	σf 1	0.15820 E+01	847	0	221	0	- 177	0	- 537	0
	σf 2	0.21164 E+00	-1314	0	364	0	- 307	0	- 973	0
	σf 3	0.97746 E-20	- 88	0	- 25	0	20	0	66	0
	σf 4	0.92050 E-20	- 399	0	- 76	0	53	0	149	0
^{135}Xe	σa 1	0.90149 E-03	312	0	69	0	- 48	0	- 123	0
	σa 2	0.15779 E-01	- 127	0	- 44	0	44	0	146	0
	σa 3	0.37052 E+03	3706	0	1123	0	- 982	0	-3217	0
	σa 4	0.13822 E+07	11214	277	2409	64	-1787	- 49	-5021	- 141
^{149}Sm	σa 1	0.46254 E-01	240	0	50	0	- 30	0	- 69	0
	σa 2	0.10890 E+01	- 138	0	- 46	0	46	0	156	0
	σa 3	0.30978 E+03	3335	0	1001	0	- 862	0	-2818	0
	σa 4	0.40359 E+05	6407	40	1620	10	-1279	- 8	-3766	- 23
Eau	σa 1	0.97829 E-02	694	1	212	0	- 193	0	- 642	- 1
	σa 2	0.29633 E-19	- 202	0	- 54	0	40	0	125	0
	σa 3	0.25025 E-01	2625	11	763	3	- 659	- 3	-2142	- 8
	σa 4	0.36482 E+00	8777	374	1710	64	-1220	- 41	-3322	- 100
Bore Soluble	σa 1	0.86741 E-01	- 267	0	- 63	0	47	0	133	0
	σa 2	0.41409 E+00	- 343	0	- 101	0	87	0	283	0
	σa 3	0.29444 E+02	2544	12	740	3	- 645	- 3	-2082	- 9
	σa 4	0.42191 E+03	8746	432	1704	73	-1216	- 47	-3313	- 116
Produits de fission	σa 1	0.70796 E-02	381	0	88	0	- 64	0	- 175	0
	σa 2	0.72933 E-01	- 97	0	- 36	0	36	0	125	0
	σa 3	0.56129 E+01	1963	35	558	11	- 476	- 10	-1539	- 35
	σa 4	0.92541 E+01	9379	194	1726	36	-1180	- 25	-3064	- 64
Corps 10	Σ a 1	0.21992 E-03	1476	3	408	1	- 340	- 1	-1073	- 3
	Σ a 2	0.99432 E-04	- 427	- 1	- 100	0	80	0	239	1
	Σ a 3	-0.19147 E-03	-33268	63	3198	- 7	-6601	15	-29678	73
	Σ a 4	0.27625 E-02	-10911	- 209	-1998	- 39	1283	25	2897	56
	$\Sigma_{r1\to2}$	0.63474 E-01	15406	600	3920	173	-3117	- 150	-9298	- 487
	$\Sigma_{r2\to3}$	0.56700 E-01	22106	- 432	5598	- 124	-4438	107	-13204	344
	$\Sigma_{r3\to4}$	0.49871 E-01	26706	-4552	6760	-1303	-5353	1123	-15894	3620

TABLEAU 3.4. - EFFET DOPPLER

Cellule périphérique de l'assemblage 3.1.% 16 BP, 12000 MWJ/T, 600 ppm de bore

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_C^* = 650°C$	$T = 200°C$ $K_\infty^C = 1.08668$		$T = 286°C$ $K_\infty^C = 1.08388$		$T = 850°C$ $K_\infty^C = 1.06627$		$T = 1500°C$ $K_\infty^C = 1.05055$	
			$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta K\infty/K\infty$
^{235}U	σa 1	0.13322 E+01	30	0	30	0	- 7	0	- 38	0
	σa 2	0.22151 E+01	- 23	0	- 18	0	9	0	41	0
	σa 3	0.35761 E+02	461	28	391	24	- 173	- 10	- 707	- 42
	σa 4	0.29727 E+03	20	6	17	5	- 13	- 4	- 57	- 17
	σf 1	0.12924 E+01	31	0	23	0	- 8	0	- 39	0
	σf 2	0.17598 E+01	- 17	0	- 17	0	6	0	28	0
	σf 3	0.23279 E+02	430	- 39	361	- 33	- 159	14	- 638	58
	σf 4	0.25289 E+03	24	- 11	20	- 9	- 12	5	- 55	25
^{238}U	σa 1	0.48097 E+00	- 4	0	- 4	0	2	0	8	0
	σa 2	0.25430 E+00	-1518	- 41	-1113	- 30	370	10	1341	36
	σa 3	0.22582 E+01	-6133	-1108	-5057	- 914	2196	398	8954	1623
	σa 4	0.13178 E+01	23	1	23	1	- 8	0	- 46	- 3
	σf 1	0.42369 E+00	- 17	1	- 14	1	7	- 1	26	- 2
	σf 2	0.66777 E-03	102	0	84	0	- 36	0	- 147	0
^{236}U	σa 1	0.27493 E+00	- 58	0	- 47	0	25	0	95	0
	σa 2	0.48026 E+00	- 19	0	- 17	0	6	0	33	0
	σa 3	0.26276 E+02	464	2	415	2	- 190	- 1	- 822	- 4
	σa 4	0.29361 E+01	20	0	17	0	- 10	0	- 51	0
^{239}Pu	σa 1	0.19320 E+01	31	0	26	0	- 10	0	- 41	0
	σa 2	0.20069 E+01	0	0	0	0	5	0	10	0
	σa 3	0.40650 E+02	298	4	246	4	- 113	- 2	- 445	- 6
	σa 4	0.10692 E+04	- 56	- 13	- 47	- 11	19	4	95	22
	σf 1	0.19087 E+01	31	0	26	0	- 10	0	- 42	0
	σf 2	0.16464 E+01	12	0	6	0	0	0	- 6	0
	σf 3	0.24870 E+02	354	- 9	294	- 7	- 129	3	- 515	13
	σf 4	0.68688 E+03	- 41	12	- 33	10	19	- 6	80	- 25
^{240}Pu	σa 1	0.16459 E+01	30	0	24	0	- 12	0	- 43	0
	σa 2	0.75192 E+00	11	0	8	0	- 3	0	- 11	0
	σa 3	0.48839 E+03	-4275	- 137	-3235	- 103	1413	45	5066	158
	σa 4	0.17355 E+03	- 23	0	- 23	0	6	0	35	0
^{241}Pu	σa 1	0.17390 E+01	29	0	23	0	- 12	0	- 40	0
	σa 2	0.25654 E+01	- 19	0	- 16	0	8	0	35	0
	σa 3	0.63362 E+02	524	1	469	1	- 210	0	- 908	- 2
	σa 4	0.93640 E+03	- 18	0	- 15	0	7	0	32	1
	σf 1	0.17295 E+01	29	0	23	0	- 12	0	- 40	0
	σf 2	0.22725 E+01	- 18	0	- 13	0	4	0	26	0
	σf 3	0.48734 E+02	550	- 2	490	- 2	- 220	1	- 950	- 4
	σf 4	0.65910 E+03	- 14	0	- 11	0	6	0	21	- 1

TABLEAU 3.4. - SUITE

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à T_M^* = 306°C T_c^* = 650°C	T_c = 200°C K∞ = 1.08668		T_c = 286°C K∞ = 1.08388		T_c = 850°C K∞ = 1.06627		T_c = 1500°C K∞ = 1.05055	
			Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞
^{242}Pu	σ a 1	0.16178 E+01	25	0	19	0	- 6	0	- 31	0
	σ a 2	0.46378 E+00	19	0	15	0	- 4	0	- 19	0
	σ a 3	0.87472 E+02	304	0	273	0	- 133	0	- 620	0
	σ a 4	0.94894 E+01	15	0	14	0	- 11	0	- 44	0
	σ f 1	0.15820 E+01	19	0	19	0	- 6	0	- 32	0
	σ f 2	0.21164 E+00	90	0	71	0	- 28	0	- 123	0
	σ f 3	0.97746 E-20	87	0	72	0	- 31	0	- 126	0
	σ f 4	0.92050 E-20	- 5	0	- 4	0	1	0	3	0
^{135}Xe	σ a 1	0.90149 E-03	88	0	72	0	- 32	0	- 129	0
	σ a 2	0.15779 E-01	- 51	0	- 44	0	19	0	89	0
	σ a 3	0.37052 E+03	839	0	688	0	- 297	0	-1134	0
	σ a 4	0.13822 E+07	36	1	36	1	- 22	- 1	- 101	- 3
^{149}Sm	σ a 1	0.46254 E-01	97	0	80	0	- 35	0	- 141	0
	σ a 2	0.10890 E+01	- 46	0	- 46	0	27	0	101	0
	σ a 3	0.30978 E+03	872	0	710	0	- 303	0	-1169	0
	σ a 4	0.40359 E+05	27	0	25	0	- 15	0	- 69	0
Eau	σ a 1	0.97829 E-02	- 188	0	- 154	0	68	0	278	0
	σ a 2	0.29633 E-19	- 7	0	- 3	0	0	0	7	0
	σ a 3	0.25025 E-01	444	2	376	1	- 164	- 1	- 675	- 3
	σ a 4	0.36482 E+00	14	0	11	0	- 5	0	- 30	- 1
Bore Soluble	σ a 1	0.86741 E-01	- 40	0	- 33	0	15	0	59	0
	σ a 2	0.41409 E+00	- 60	0	- 51	0	22	0	89	0
	σ a 3	0.29444 E+02	425	2	360	2	- 160	- 1	- 625	- 3
	σ a 4	0.42191 E+03	12	0	12	0	- 7	0	- 31	- 1
Produits de fission	σ a 1	0.70796 E-02	79	0	65	0	- 28	0	- 116	0
	σ a 2	0.72933 E-01	- 47	0	- 40	0	19	0	81	0
	σ a 3	0.56129 E+01	474	10	412	9	- 194	- 4	- 812	- 17
	σ a 4	0.92541 E+01	30	0	26	0	- 15	0	- 72	- 2
Corps 10	Σa 1	0.21992 E-03	- 126	0	- 103	0	45	0	187	0
	Σa 2	0.99432 E-04	- 43	0	- 37	0	17	0	72	0
	Σa 3	-0.19147 E-03	-6413	14	-5913	13	5115	- 11	23198	- 51
	Σa 4	0.27625 E-02	-1304	- 26	-1182	- 23	911	18	4102	80
	$\Sigma_{r1\ 2}$	0.63474 E-01	59	3	48	2	- 21	- 1	- 86	- 4
	$\Sigma_{r2\ 3}$	0.56700 E-01	- 85	2	- 72	1	34	- 1	139	- 3
	$\Sigma_{r3\ 4}$	0.49871 E-01	511	- 99	432	- 84	- 186	38	- 752	161

TABLEAU 3.5. - EFFET MODERATEUR

Cellule périphérique de l'assemblage 2.1.% SP, 12000 MWJ/T, 600 ppm de bore

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_C^* = 650°C$	$T_M = 200°C$ $K\infty =$		$T_M = 286°C$ $K\infty = 0.97914$		$T_M = 320°C$ $K\infty = 0.97180$		$T_M = 340°C$ $K\infty = 0.96183$	
			Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞
^{235}U	σ a 1	0.13299 E+01			188	0	- 143	0	- 444	- 1
	σ a 2	0.22165 E+01			23	0	- 14	0	- 36	0
	σ a 3	0.36568 E+02			317	10	- 273	- 10	- 875	- 33
	σ a 4	0.31595 E+03			1684	383	-1184	- 268	-3178	- 713
	σ f 1	0.12905 E+01			194	- 1	- 147	0	- 457	2
	σ f 2	0.17607 E+01			34	0	- 28	0	- 68	0
	σ f 3	0.23758 E+02			320	- 18	- 274	16	- 876	57
	σ f 4	0.26893 E+03			1718	- 630	-1208	438	-3242	1159
^{238}U	σ a 1	0.48206 E+00			257	9	- 212	- 8	- 645	- 26
	σ a 2	0.25448 E+00			67	2	- 51	- 1	- 134	- 4
	σ a 3	0.22588 E+01			956	168	- 806	- 152	-2550	- 516
	σ a 4	0.13918 E+01			1430	123	-1013	- 87	-2716	- 233
	σ f 1	0.42527 E+00			287	- 25	- 233	22	- 717	73
	σ f 2	0.66662 E-03			384	0	- 332	0	-1058	0
^{236}U	σ a 1	0.27941 E+00			508	0	- 419	0	-1313	0
	σ a 2	0.48056 E+00			46	0	- 35	0	- 98	0
	σ a 3	0.26703 E+02			700	2	- 599	- 2	-1914	- 8
	σ a 4	0.31020 E+01			1438	0	-1019	0	-2740	- 1
^{239}Pu	σ a 1	0.19285 E+01			187	0	- 150	0	- 451	0
	σ a 2	0.20074 E+01			70	0	- 55	0	- 164	0
	σ a 3	0.41187 E+02			243	3	- 211	- 3	- 685	- 10
	σ a 4	0.10683 E+04			-1011	- 275	721	198	1928	530
	σ f 1	0.19054 E+01			189	0	- 152	0	- 457	1
	σ f 2	0.16464 E+01			85	0	- 73	0	- 219	1
	σ f 3	0.25204 E+02			278	- 7	- 246	7	- 790	23
	σ f 4	0.69045 E+03			- 727	288	529	- 207	1403	- 543
^{240}Pu	σ a 1	0.16434 E+01			189	0	- 146	0	- 444	0
	σ a 2	0.75196 E+00			128	0	- 108	0	- 331	0
	σ a 3	0.46393 E+03			1832	67	-1558	- 61	-4955	- 209
	σ a 4	0.17788 E+03			607	7	- 382	- 4	- 916	- 10
^{241}Pu	σ a 1	0.17361 E+01			184	0	- 150	0	- 449	0
	σ a 2	0.25668 E+01			27	0	- 16	0	- 43	0
	σ a 3	0.64309 E+02			415	1	- 356	- 1	-1141	- 3
	σ a 4	0.97249 E+03			219	6	- 190	- 5	- 647	- 18
	σ f 1	0.17267 E+01			185	0	- 151	0	- 452	0
	σ f 2	0.22736 E+01			35	0	- 26	0	- 70	0
	σ f 3	0.49425 E+02			393	- 2	- 334	2	-1072	7
	σ f 4	0.68775 E+03			410	- 19	- 330	15	-1021	46

TABLEAU 3.5. - SUITE

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_C^* = 650°C$	T_M = 200°C K∞ =		T_M = 286°C K∞ = 0.97914		T_M = 320°C K∞ = 0.97180		T_M = 340°C K∞ = 0.96183	
			Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞
^{242}Pu	σ a 1	0.16171 E+01			204	0	- 167	0	- 507	0
	σ a 2	0.46377 E+00			151	0	- 127	0	- 395	0
	σ a 3	0.89401 E+02			510	0	- 441	0	-1419	1
	σ a 4	0.99603 E+01			1232	0	- 866	0	-2313	0
	σ f 1	0.15815 E+01			209	0	- 171	0	- 512	0
	σ f 2	0.21134 E+00			331	0	- 289	0	- 918	0
	σ f 3	0.97895 E-20			- 24	0	19	0	62	0
	σ f 4	0.93719 E-20			- 48	0	33	0	92	0
^{135}Xe	σ a 1	0.89364 E-03			50	0	- 34	0	- 87	0
	σ a 2	0.15803 E-01			- 25	0	32	0	114	0
	σ a 3	0.37981 E+03			982	0	- 866	0	-2838	0
	σ a 4	0.15000 E+07			2247	58	-1640	- 44	-4520	- 124
^{149}Sm	σ a 1	0.45813 E-01			26	0	- 17	0	- 33	0
	σ a 2	0.10908 E+01			- 27	0	37	0	119	0
	σ a 3	0.31649 E+03			891	0	- 777	0	-2531	0
	σ a 4	0.43371 E+05			1441	8	-1123	- 6	-3263	- 18
Eau	σ a 1	0.10043 E-01			239	0	- 209	0	- 680	- 1
	σ a 2	0.29634 E-19			- 51	0	40	0	125	0
	σ a 3	0.25427 E-01			680	3	- 586	- 2	-1896	- 7
	σ a 4	0.37344 E+00			1658	79	-1165	- 50	-3122	- 121
Bore soluble	σ a 1	0.87094 E-01			- 53	0	39	0	111	0
	σ a 2	0.41452 E+00			- 84	0	75	0	251	0
	σ a 3	0.29902 E+02			662	3	- 569	- 3	-1843	- 8
	σ a 4	0.43183 E+03			1653	91	-1160	- 58	-3112	- 140
Produits de fission	σ a 1	0.70698 E-02			71	0	- 51	0	- 143	0
	σ a 2	0.73841 E-01			- 22	0	24	0	93	0
	σ a 3	0.57589 E+01			500	10	- 427	- 9	-1372	- 32
	σ a 4	0.90484 E+01			1702	44	-1149	- 29	-2939	- 75
Corps 10	Σa 1	0.224590E-03			420	1	- 346	- 1	-1079	- 3
	Σa 2	0.995714E-04			- 86	0	69	0	208	1
	Σa 3	-0.304284E-03			3250	- 11	-5065	19	-21164	83
	Σa 4	0.259910E-02			-1509	- 35	1002	23	2375	55
	$\Sigma_{r1\to2}$	0.631047E-01			3907	203	-3108	- 175	-9276	- 565
	$\Sigma_{r2\to3}$	0.568048E-01			5621	- 131	-4453	113	-13242	365
	$\Sigma_{r3\to4}$	0.509370E-01			6644	-1355	-5259	1171	-15613	3781

TABLEAU 3.6. - EFFET DOPPLER

Cellule périphérique de l'assemblage 2.1% SP, 12000 MWJ/T, 600 ppm de bore

Isotope	Type de réction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_C^* = 650°C$	T_c = 200°C $K\infty$ = 0.98963		T_c = 286°C $K\infty$ = 0.98704		T_c = 850°C $K\infty$ = 0.97062		T_c = 1500°C $K\infty$ = 0.95587	
			Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞
^{235}U	σ a 1	0.13299 E+01	30	0	30	0	- 8	0	- 38	0
	σ a 2	0.22165 E+01	- 23	0	- 18	0	9	0	36	0
	σ a 3	0.36568 E+02	473	16	402	14	- 180	- 6	- 733	- 25
	σ a 4	0.31595 E+03	25	6	22	5	- 13	- 3	- 63	- 14
	σ f 1	0.12905 E+01	31	0	23	0	- 8	0	- 39	0
	σ f 2	0.17607 E+01	- 17	0	- 17	0	6	0	28	0
	σ f 3	0.23758 E+02	450	- 26	375	- 21	- 164	9	- 661	38
	σ f 4	0.26893 E+03	26	- 9	22	- 8	- 15	5	- 67	24
^{238}U	σ a 1	0.48206 E+00	- 10	0	- 8	0	2	0	15	1
	σ a 2	0.25448 E+00	-1525	- 42	-1120	- 30	369	10	1340	36
	σ a 3	0.22588 E+01	-6056	-1108	-5007	- 916	2165	396	8863	1625
	σ a 4	0.13918 E+01	22	2	22	2	- 14	- 1	- 57	- 5
	σ f 1	0.42527 E+00	- 24	2	- 19	2	9	- 1	35	- 3
	σ f 2	0.66662 E-03	96	0	79	0	- 35	0	- 141	0
^{236}U	σ a 1	0.27941 E+00	- 86	0	- 68	0	32	0	129	0
	σ a 2	0.48056 E+00	- 15	0	- 15	0	6	0	31	0
	σ a 3	0.26703 E+02	457	2	412	2	- 187	- 1	- 813	- 3
	σ a 4	0.31020 E+01	19	0	19	0	- 16	0	- 61	0
^{239}Pu	σ a 1	0.19285 E+01	31	0	26	0	- 10	0	- 41	0
	σ a 2	0.20074 E+01	0	0	- 5	0	0	0	5	0
	σ a 3	0.41187 E+02	299	4	248	3	- 112	- 2	- 447	- 6
	σ a 4	0.10683 E+04	- 47	- 13	- 37	- 10	19	5	103	28
	σ f 1	0.19054 E+01	26	0	21	0	- 11	0	- 42	0
	σ f 2	0.16464 E+01	6	0	6	0	- 6	0	- 12	0
	σ f 3	0.25204 E+02	353	- 9	294	- 7	- 131	3	- 524	14
	σ f 4	0.69045 E+03	- 41	16	- 33	13	20	- 8	84	- 33
^{240}Pu	σ a 1	0.16434 E+01	30	0	24	0	- 6	0	- 37	0
	σ a 2	0.75196 E+00	11	0	8	0	- 4	0	- 11	0
	σ a 3	0.46393 E+03	-4274	- 164	-3253	- 125	1472	56	5382	202
	σ a 4	0.17788 E+03	- 11	0	- 11	0	6	0	17	0
^{241}Pu	σ a 1	0.17361 E+01	29	0	23	0	- 11	0	- 46	0
	σ a 2	0.25668 E+01	- 16	0	- 16	0	8	0	31	0
	σ a 3	0.64309 E+02	516	0	463	1	- 207	0	- 900	- 2
	σ a 4	0.97249 E+03	- 19	0	- 14	0	7	0	33	1
	σ f 1	0.17267 E+01	29	0	23	0	- 12	0	- 46	0
	σ f 2	0.22736 E+01	- 18	0	- 13	0	4	0	26	0
	σ f 3	0.49425 E+02	542	- 3	488	- 3	- 216	1	- 943	6
	σ f 4	0.68775 E+03	- 13	1	- 10	0	4	0	20	- 1

TABLEAU 3.6. - SUITE

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à T_M^* = 306°C T_C^* = 650°C	T_c = 200°C K∞ = 0.98963		T_c = 286°C K∞ = 0.98704		T_c = 850°C K∞ = 0.97062		T_c = 1500°C K∞ = 0.95587	
			Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞	Δσ/σ	ΔK∞/K∞
^{242}Pu	σ a 1	0.16171 E+01	19	0	19	0	- 6	0	- 31	0
	σ a 2	0.46377 E+00	17	0	13	0	- 6	0	- 19	0
	σ a 3	0.89401 E+02	290	0	262	0	- 128	- 0	- 602	0
	σ a 4	0.99603 E+01	19	0	17	0	- 11	0	- 51	0
	σ f 1	0.15815 E+01	19	0	19	0	- 6	0	- 25	0
	σ f 2	0.21134 E+00	80	0	66	0	- 33	0	- 123	0
	σ f 3	0.97895 E-20	89	0	74	0	- 33	0	- 130	0
	σ f 4	0.93719 E-20	- 4	0	- 3	0	1	0	3	0
^{135}Xe	σ a 1	0.89364 E-03	98	0	81	0	- 35	0	- 142	0
	σ a 2	0.15803 E-01	- 44	0	- 38	0	19	0	89	0
	σ a 3	0.37981 E+03	911	0	745	0	- 329	0	-1251	0
	σ a 4	0.15000 E+07	40	1	33	1	- 27	- 1	- 107	- 3
^{149}Sm	σ a 1	0.45813 E-01	107	0	87	0	- 39	0	- 157	0
	σ a 2	0.10908 E+01	- 46	0	- 46	0	18	0	92	0
	σ a 3	0.31649 E+03	935	0	761	0	- 332	0	-1283	0
	σ a 4	0.43371 E+05	25	0	23	0	- 16	0	- 71	0
Eau	σ a 1	0.10043 E-01	- 219	0	- 179	0	80	0	329	1
	σ a 2	0.29634 E-19	- 3	0	- 3	0	3	0	7	0
	σ a 3	0.25427 E-01	460	2	389	2	- 173	- 1	- 704	- 3
	σ a 4	0.37344 E+00	13	1	11	1	- 8	0	- 35	- 2
Bore soluble	σ a 1	0.87094 E-01	- 45	0	- 37	0	16	0	65	0
	σ a 2	0.41452 E+00	- 53	0	- 46	0	22	0	87	0
	σ a 3	0.29902 E+02	441	2	375	2	- 164	- 1	- 676	- 3
	σ a 4	0.43183 E+03	14	1	12	1	- 7	0	- 35	- 2
Produits de fission	σ a 1	0.70698 E-02	88	0	72	0	- 31	0	- 127	0
	σ a 2	0.73841 E-01	- 42	0	- 38	0	18	0	75	0
	σ a 3	0.57589 E+01	486	11	422	9	- 198	- 4	- 835	- 18
	σ a 4	0.90484 E+01	35	1	30	1	- 19	- 1	- 83	- 2
Corps 10	Σa 1	0.224590 E-03	- 155	0	- 127	0	57	0	232	1
	Σa 2	0.995714 E-04	- 40	0	- 34	0	15	0	66	0
	Σa 3	-0.304284E-03	-4009	14	-3716	13	3284	- 12	14886	- 52
	Σa 4	0.259910 E-02	-1077	- 25	- 979	- 23	762	18	3429	79
	$\Sigma_{r1\to2}$	0.631047 E-01	67	4	55	3	- 24	- 1	- 98	- 5
	$\Sigma_{r2\to3}$	0.568048 E-01	- 78	2	- 67	2	32	- 1	130	- 3
	$\Sigma_{r3\to4}$	0.509370 E-01	539	- 110	455	- 94	- 198	43	- 802	182

A.6.2.3. - Conclusion

Il ressort de l'étude faite sur les trois types d'assemblages qui différent par l'enrichissement et par le nombre de crayons empoisonnés que la sensibilité d'une section à l'effet modérateur dépend de l'enrichissement et très peu du nombre de poison dans l'assemblage, sauf les sections du poison. Il en est de même pour l'effet Doppler.

L'influence de ces paramètres n'oblige pas à une rectification du critère de sensibilité des sections vis à vis des effets de contre-réactions. Sa valeur sera utilisée pour tous les assemblages lors des ajustements polynomiaux des sections en fonctions des températures du modérateur et du combustible.

Nous verrons dans le chapitre IV que ces différents paramètres (enrichissement, poison) ne constituent pas un poids déterminant pour la nature de l'ajustement de toutes les sections en fonction de la densité d'eau ou de la température combustible ; le degré du polynôme dépend essentiellement de la réaction et de l'isotope.

A.6.3. - Détermination préliminaire du degré des ajustements

Ayant déterminé toutes les sections sensibles aux effets de contre-réactions, on recherchera le degré du polynôme correspondant à chacune des sections afin de réduire l'écart sur la réactivité introduit pour la représentation polynomiale de chaque section lorsque toutes les autres sont à la température T_θ (T_θ température que peut avoir soit le combustible soit le modérateur dans les domaines déjà cités).

Le tableau (3.7.) montre l'effet sur la réactivité de chaque section :

- lorsque celle-ci varie de 1% autour des conditions nominales de températures, indépendamment des autres sections,

- l'effet le plus grand dans l'une des températures du modérateur lorsque la section sensible est paramétrée en fonction de la densité de l'eau,

- l'effet le plus grand dans l'une des températures du combustible lorsque la section sensible est paramétrée en fonction du rapport des puissances spécifiques.

Les abréviations C_t, L, P et C se rapportent respectivement à pas d'ajustement, ajustement linéaire, parabolique et cubique.

TABLEAU 3.7.

Cellule périphérique (3.1% SP k_∞ (306-650) = 1.06734), 12000 MWJ/T
600 ppm de bore
Evolution du plus grand écart résiduel sur la réactivité quand la correction liée à l'effet de température est représentée par un polynôme constant (C_t), linéaire (L), parabolique (P) ou cubique (C)

Isotope	Type de réaction	$\Delta K_\infty/K_\infty$ dû à $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ = 1% (pcm)	Plus grand $\Delta K_\infty/K_\infty$ Modérateur 200-286-320-340°C (pcm)				Plus grand $\Delta K_\infty/K_\infty$ Doppler 200-286-850-1500°C (pcm)			
			Ct	L	P	C	Ct	L	P	C
^{235}U	σ a 1	2	1				0			
	σ a 2	5	0				0			
	σ a 3	59	64	10	0		24	3		
	σ a 4	311	1757	188	26	4	13	2		
	σ f 1	5	4				0			
	σ f 2	9	1				0			
	σ f 3	90	100	16	1		52	5		
	σ f 4	461	3777	652	58	8	28	4		
^{238}U	σ a 1	36	32	1			0			
	σ a 2	27	7				38	15	3	
	σ a 3	181	548	62	2		1344	168	36	25
	σ a 4	67	321	53	4		2			
	σ f 1	83	87	4			2			
	σ f 2	0	0				0			
^{236}U	σ a 1	0	0				0			
	σ a 2	0	0				0			
	σ a 3	4	10	1			3			
	σ a 4	0	2				0			
^{239}Pu	σ a 1	0	0				0			
	σ a 2	1	0				0			
	σ a 3	13	11	2			5			
	σ a 4	224	790	93	1		15	1		
	σ f 1	2	1				0			
	σ f 2	2	0				0			
	σ f 3	23	23	4			10	1		
	σ f 4	296	1049	117	3		24	1		
^{240}Pu	σ a 1	0	0				0			
	σ a 2	0	0				0			
	σ a 3	31	168	24	1		136	34	3	
	σ a 4	7	15	4			0			
^{241}Pu	σ a 1	0	0				0			
	σ a 2	0	0				0			
	σ a 3	2	3				1			
	σ a 4	17	10	2			0			
	σ f 1	0	0				0			
	σ f 2	0	0				0			
	σ f 3	4	6				4			
	σ f 4	25	43	1			1			

TABLEAU 3.7. - SUITE

Isotope	Type de réaction	$\Delta K\infty/K\infty$ dû à $\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = 1\%$ (pcm)	Plus grand $K\infty/K\infty$ Modérateur 200-286-320-340°C (pcm)				Plus grand $K\infty/K\infty$ Doppler 200-286-850-1500°C (pcm)			
			Ct	L	P	C	Ct	L	P	C
^{242}Pu	σ a 1	0	0				0			
	σ a 2	0	0				0			
	σ a 3	0	0				0			
	σ a 4	0	0				0			
	σ f 1	0	0				0			
	σ f 2	0	0				0			
	σ f 3	0	0				0			
	σ f 4	0	0				0			
^{135}Xe	σ a 1	0	0				0			
	σ a 2	0	0				0			
	σ a 3	0	0				0			
	σ a 4	27	192	25	2		2			
^{149}Sm	σ a 1	0	0				0			
	σ a 2	0	0				0			
	σ a 3	0	0				0			
	σ a 4	6	26	0			0			
Eau	σ a 1	1	1				0			
	σ a 2	0	0				0			
	σ a 3	4	10	2			3			
	σ a 4	36	235	42	4		1			
Bore soluble	σ a 1	0	0				0			
	σ a 2	0	0				0			
	σ a 3	4	11	2			3			
	σ a 4	42	272	48	4		1			
Produits de fission	σ a 1	0	0				0			
	σ a 2	0	0				0			
	σ a 3	21	35	5			15	1		
	σ a 4	21	130	28	2		1			
Corps 10	Σa 1	2	3				0			
	Σa 2	1	1				0			
	Σa 3	3	94	92	3		43	9	2	
	Σa 4	20	165	32	1		60	10	2	
	$\Sigma_{r1\to2}$	46	219	1			1			
	$\Sigma_{r2\to3}$	23	797	1			6			
	$\Sigma_{r3\to4}$	200	4123	12	1		144	15	3	

La précision sur la réactivité augmente progressivement quand le degré du paramétrage croit. Des polynômes cubiques semblent nécessaires pour les sections d'absorption et de fission thermiques de l'^{235}U dans l'effet de densité d'eau. Même constatation pour l'absorption épithermique de l'^{238}U dans l'effet Doppler.

Les résultats sont illustrés par les figures 3.1. et 3.2. à partir desquelles, on peut prévoir le degré des ajustements de ces sections qui dépendent également du poids de la réaction dans le bilan de réactivité.

La section épithermique de l'^{238}U, prépondérante dans le calcul de l'effet Doppler et la section thermique de l'^{235}U très importante dans l'effet modérateur, exigent une correction de type cubique pour satisfaire au critère de précision imposé.

A.6.4. - Comparaison des $\Delta\sigma/\sigma$ suivant la position géométrique de la cellule dans l'assemblage

Le choix de la cellule périphérique pour rechercher les sections efficaces sensibles aux effets de températures a été motivé par la possibilité d'une perturbation du spectre à cause des hétérogénéités locales. Mais il est remarquable que la loi de variation des sections en fonction de l'effet modérateur et de l'effet Doppler ne dépend que de très peu de la position géométrique dans l'assemblage. Comme on peut le constater sur les tableaux 3.8 à 3.10, dans lesquels sont représentées les variations des sections efficaces et des réactivités correspondantes quand la température :

- du modérateur varie au maximum de 306 à 200 °C
- du combustible varie au maximum de 650 à 1500 °C

à partir des conditions nominales (T_m = 306, T_c = 650°C) dans les cellules latérales à un trou d'eau ou à un crayon de poison et une cellule diagonale (angle) à un trou d'eau de l'assemblage enrichi à 3.1% 16 BP.

TABLEAU 3.8. - 3.1% 16 BP, 12000 MWJ/T, 600 ppm de bore

Cellule combustible "jouxtant" une cellule "trou d'eau"

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_C^* = 650°C$	$T_M = 200°C$ $K\infty = 1.08477$		$T_C = 1500°C$ $K\infty = 1.04184$	
			$\left(\frac{\sigma(200)}{\sigma(306)} -1\right)10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ pcm	$\left(\frac{\sigma(1500)}{\sigma(650)} -1\right)10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ pcm
^{235}U	σ a 1	0.13352 E+01	809	2	- 45	0
	σ a 2	0.22239 E+01	94	0	36	0
	σ a 3	0.36075 E+02	1267	67	- 668	- 40
	σ a 4	0.29966 E+03	8717	2690	- 60	- 18
	σ f 1	0.12954 E+01	818	- 4	- 46	0
	σ f 2	0.17657 E+01	147	- 1	28	0
	σ f 3	0.23473 E+02	1257	- 99	- 592	56
	σ f 4	0.25493 E+03	8916	- 3942	- 63	28
^{238}U	σ a 1	0.48227 E+0	1060	36	6	0
	σ a 2	0.25570 E+0	246	6	1345	39
	σ a 3	0.22926 E+01	3372	548	9051	1702
	σ a 4	0.13271 E+01	7317	466	- 53	- 3
	σ f 1	0.42490 E+0	1156	- 87	26	- 2
	σ f 2	0.66309 E-03	1564	0	- 142	0
^{236}U	σ a 1	0.27581 E+0	1929	0	94	0
	σ a 2	0.48217 E+0	185	0	31	0
	σ a 3	0.26780 E+02	2562	10	- 754	- 3
	σ a 4	0.29570 E+01	7352	2	- 54	0
^{239}Pu	σ a 1	0.19364 E+01	816	0	- 46	0
	σ a 2	0.20108 E+01	288	0	10	0
	σ a 3	0.40930 E+02	987	13	- 410	- 6
	σ a 4	0.10726 E+04	- 4736	- 1072	93	22
	σ f 1	0.19130 E+01	821	- 2	- 47	0
	σ f 2	0.16475 E+01	370	- 1	- 6	0
	σ f 3	0.25060 E+02	1133	- 24	- 475	12
	σ f 4	0.68943 E+03	- 3403	1032	77	- 23
^{240}Pu	σ a 1	0.16495 E+01	812	0	- 42	0
	σ a 2	0.75293 F+0	515	0	- 11	0
	σ a 3	0.50854 E+03	6361	185	4997	166
	σ a 4	0.17404 E+03	3229	21	34	0
^{241}Pu	σ a 1	0.17429 E+01	809	0	- 46	0
	σ a 2	0.25743 E+01	117	0	31	0
	σ a 3	0.64149 E+02	1618	3	- 865	- 2
	σ a 4	0.94253 E+03	885	15	27	0
	σ f 1	0.17334 E+01	813	0	- 46	0
	σ f 2	0.22796 E+01	149	0	26	0
	σ f 3	0.49326 E+02	1514	- 6	- 908	4
	σ f 4	0.66370 E+03	1837	- 48	15	0

TABLEAU 3.8. - SUITE

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_C^* = 650°C$	$T_M = 200°C$ $K\infty = 1.08477$		$T_C = 1500°C$ $K\infty = 1.04184$	
			$\left(\frac{\sigma(200)}{\sigma(306)} - 1\right)10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ pcm	$\left(\frac{\sigma(1500)}{\sigma(650)} - 1\right)10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ pcm
^{242}Pu	σ a 1	0.16215 E+01	888	0	- 31	0
	σ a 2	0.46423 E+0	605	0	- 19	0
	σ a 3	0.88408 E+02	1762	0	- 583	0
	σ a 4	0.95483 E+01	6302	0	- 46	0
	σ f 1	0.15856 E+01	896	0	- 32	0
	σ f 2	0.21044 E+0	1359	0	- 119	0
	σ f 3	0.97819 E-20	- 79	0	- 124	0
	σ f 4	0.92295 E-20	- 390	0	3	0
^{135}Xe	σ a 1	0.90279 E-03	356	0	- 132	0
	σ a 2	0.15910 E-01	- 126	0	88	0
	σ a 3	0.37747 E+03	3823	0	- 1068	0
	σ a 4	0.13970 E+07	11253	278	- 100	- 3
^{149}Sm	σ a 1	0.46313 E-01	285	0	- 145	0
	σ a 2	0.10985 E+01	- 137	0	91	0
	σ a 3	0.31533 E+03	3409	0	- 1100	0
	σ a 4	0.40743 E+05	6416	40	- 74	0
Eau	σ a 1	0.97648 E-02	671	1	288	0
	σ a 2	0.29603 E-19	- 226	0	7	0
	σ a 3	0.25371 E-01	2661	10	- 627	- 2
	σ a 4	0.36695 E+0	8840	349	- 33	- 1
Bore soluble	σ a 1	0.86520 E-01	- 328	0	62	0
	σ a 2	0.41677 E+01	- 362	0	86	0
	σ a 3	0.29836 E+02	2587	12	- 600	- 3
	σ a 4	0.42437 E+03	8811	404	- 33	- 1
Produits de fission	σ a 1	0.70911 E-02	424	0	- 120	0
	σ a 2	0.73466 E-01	- 97	0	76	0
	σ a 3	0.56871 E+01	1936	36	- 760	- 16
	σ a 4	0.93067 E+01	9523	196	- 73	- 1
Corps 10	Σ a 1	0.22968 E-03	1520	3	191	1
	Σ a 2	0.10425 E-03	- 438	- 1	69	0
	Σ a 3	-0.16803 E-03	-37787	62	28397	- 53
	Σ a 4	0.27291 E-02	-10212	- 184	4206	77
	$\Sigma_{r1\to2}$	0.62684 E-01	15019	626	- 87	- 4
	$\Sigma_{r2\to3}$	0.55621 E-01	22063	- 455	132	- 3
	$\Sigma_{r3\to4}$	0.49172 E-01	26765	- 4730	- 686	152

TABLEAU 3.9. - 3,1 % 16 BP, 12000 MWJ/T, 600 ppm de bore

Cellule combustible jouxtant une cellule poison

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_c^* = 650°C$	$T_M = 200°C$ $K\infty = 1.08340$		$T_c = 1500°C$ $K\infty = 1.04024$	
			$\left(\frac{\sigma(200)}{\sigma(306)} - 1\right)10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ pcm	$\left(\frac{\sigma(1500)}{\sigma(650)} - 1\right)10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ pcm
^{235}U	σ a 1	0.13320 E+01	751	1	- 45	0
	σ a 2	0.22189 E+01	90	1	36	0
	σ a 3	0.35930 E+02	1275	68	- 685	- 42
	σ a 4	0.29728 E+03	8672	2664	- 57	- 17
	σ f 1	0.12922 E+01	766	- 4	- 39	0
	σ f 2	0.17621 E+01	142	- 1	28	0
	σ f 3	0.23378 E+02	1258	- 100	- 612	58
	σ f 4	0.25288 E+03	8870	- 3905	- 59	26
^{238}U	σ a 1	0.48056 E+00	1003	33	10	0
	σ a 2	0.25497 E+00	247	6	1341	39
	σ a 3	0.22806 E+01	3420	559	9015	1704
	σ a 4	0.13182 E+01	7268	461	- 53	- 3
	σ f 1	0.42322 E+00	1096	- 82	26	- 2
	σ f 2	0.66412 E-03	1488	0	- 142	0
^{236}U	σ a 1	0.27352 E+00	1883	0	99	0
	σ a 2	0.48104 E+00	179	0	31	0
	σ a 3	0.26543 E+02	2633	10	- 791	- 4
	σ a 4	0.29369 E+01	7307	2	- 54	0
^{239}Pu	σ a 1	0.19317 E+01	761	0	- 41	0
	σ a 2	0.20077 E+01	274	0	10	0
	σ a 3	0.40804 E+02	988	13	- 426	- 6
	σ a 4	0.10759 E+04	- 4638	- 1057	93	22
	σ f 1	0.19084 E+01	760	- 2	- 42	0
	σ f 2	0.16458 E+01	346	- 1	- 6	0
	σ f 3	0.24968 E+02	1133	- 25	- 493	13
	σ f 4	0.69081 E+03	- 3332	1016	78	- 24
^{240}Pu	σ a 1	0.16455 E+01	748	0	- 43	0
	σ a 2	0.75180 E+00	495	0	- 9	0
	σ a 3	0.49785 E+03	6508	187	5008	165
	σ a 4	0.17383 E+03	3164	21	35	0
^{241}Pu	σ a 1	0.17388 E+01	748	0	- 46	0
	σ a 2	0.25691 E+01	109	0	35	0
	σ a 3	0.63791 E+02	1641	3	- 887	- 2
	σ a 4	0.93921 E+03	907	16	29	0
	σ f 1	0.17293 E+01	752	0	- 46	0
	σ f 2	0.22753 E+01	141	0	26	0
	σ f 3	0.49065 E+02	1537	- 6	- 929	4
	σ f 4	0.66079 E+03	1852	- 49	18	- 1

TABLEAU 3.9. - SUITE

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_C^* = 650°C$	$T_M = 200°C$ $K\infty = 1.08340$		$T_C = 1500°C$ $K\infty = 1.04024$	
			$\left(\frac{\sigma(200)}{\sigma(306)} -1\right)10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ pcm	$\left(\frac{\sigma(1500)}{\sigma(650)} -1\right)10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ pcm
^{242}Pu	σ a 1	0.16169 E+01	829	0	- 31	0
	σ a 2	0.46358 E+00	580	0	- 19	0
	σ a 3	0.87960 E+02	1687	0	- 600	0
	σ a 4	0.94952 E+01	6254	0	- 45	0
	σ f 1	0.15811 E+01	835	0	- 32	0
	σ f 2	0.21064 E+00	1291	0	- 123	0
	σ f 3	0.97815 E-20	- 82	0	- 123	0
	σ f 4	0.92295 E-20	- 381	0	3	0
^{135}Xe	σ a 1	0.90250 E-03	295	0	- 131	0
	σ a 2	0.15846 E-01	- 114	0	88	0
	σ a 3	0.37194 E+03	3839	0	- 1097	0
	σ a 4	0.13800 E+07	11290	277	- 101	- 3
^{149}Sm	σ a 1	0.46309 E-01	225	0	- 143	0
	σ a 2	0.10939 E+01	- 119	0	91	0
	σ a 3	0.31129 E+03	3431	0	- 1131	0
	σ a 4	0.40336 E+05	6486	40	- 72	0
Eau	σ a 1	0.97117 E-02	715	1	287	0
	σ a 2	0.29619 E-19	- 213	0	7	0
	σ a 3	0.25148 E-01	2672	10	- 644	- 2
	σ a 4	0.36432 E+00	8773	346	- 33	- 1
Bore soluble	σ a 1	0.86582 E-01	- 289	0	62	0
	σ a 2	0.41560 E+00	- 334	0	84	0
	σ a 3	0.29582 E+02	2596	12	- 622	- 3
	σ a 4	0.42133 E+03	8741	399	- 33	- 1
Produits de fission	σ a 1	0.70873 E-02	364	0	- 117	0
	σ a 2	0.73204 E-01	- 86	0	76	0
	σ a 3	0.56499 E+01	1961	36	- 782	- 17
	σ a 4	0.92492 E+01	9404	193	- 72	- 2
Corps 10	Σ a 1	0.22795 E-03	1492	3	193	1
	Σ a 2	0.10393 E-03	- 420	- 1	68	0
	Σ a 3	-0.15481 E-03	-40113	61	30218	- 53
	Σ a 4	0.27851 E-02	-10455	- 193	4281	80
	$\Sigma_{r1\to2}$	0.62827 E-01	15061	625	- 88	- 4
	$\Sigma_{r2\to3}$	0.55320 E-01	22110	- 457	131	- 3
	$\Sigma_{r3\to4}$	0.48589 E-01	26785	- 4744	- 713	158

TABLEAU 3.10. - 3,1% 16 BP, 12000 MWJ/T, 600 ppm de bore

Cellule combustible "angle" d'une cellule "trou d'eau"

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_C^* = 650°C$	$T_M = 200°C$ $K^\infty = 1.08602$		$T_C = 1500°C$ $K^\infty = 1.04365$	
			$\left(\frac{\sigma(200)}{\sigma(306)} - 1\right) 10^{+5}$	$\frac{\Delta K^\infty}{K^\infty}$ pcm	$\left(\frac{\sigma(1500)}{\sigma(650)} - 1\right) 10^{+5}$	$\frac{\Delta K^\infty}{K^\infty}$ pcm
^{235}U	σa 1	0.13320 E+01	751	1	- 38	0
	σa 2	0.22152 E+01	50	0	41	0
	σa 3	0.35882 E+02	1274	68	- 694	- 42
	σa 4	0.29848 E+03	8697	2680	- 68	- 18
	σf 1	0.12923 E+01	758	- 4	- 46	0
	σf 2	0.17598 E+01	102	- 1	28	0
	σf 3	0.23361 E+02	1254	- 100	- 621	59
	σf 4	0.25393 E+03	8896	- 3930	- 63	28
^{238}U	σa 1	0.48091 E+00	996	33	8	0
	σa 2	0.25437 E+00	189	5	1341	39
	σa 3	0.22597 E+01	3452	559	8935	1674
	σa 4	0.13230 E+01	7286	463	- 53	- 3
	σf 1	0.42364 E+00	1091	- 81	26	- 2
	σf 2	0.66764 E-03	1598	0	- 145	0
^{236}U	σa 1	0.27483 E+00	1856	0	95	0
	σa 2	0.48035 E+00	139	0	33	0
	σa 3	0.26413 E+02	2616	10	- 799	- 4
	σa 4	0.29478 E+01	7324	2	- 58	0
^{239}Pu	σa 1	0.19318 E+01	756	0	- 41	0
	σa 2	0.20067 E+01	259	0	10	0
	σa 3	0.40797 E+02	980	13	- 427	- 6
	σa 4	0.10705 E+04	- 4624	- 1048	93	22
	σf 1	0.19084 E+01	760	- 1	- 42	0
	σf 2	0.16460 E+01	346	- 1	- 6	0
	σf 3	0.24970 E+02	1121	- 24	- 497	13
	σf 4	0.68789 E+03	- 3300	1002	83	- 25
^{240}Pu	σa 1	0.16456 E+01	754	0	- 36	0
	σa 2	0.75197 E+00	493	0	- 11	0
	σa 3	0.49153 E+03	6622	188	5143	167
	σa 4	0.17400 E+03	3190	21	34	0
^{241}Pu	σa 1	0.17388 E+01	748	0	- 46	0
	σa 2	0.25653 E+01	74	0	35	0
	σa 3	0.63660 E+02	1624	3	- 884	- 2
	σa 4	0.93952 E+03	929	16	31	1
	σf 1	0.17293 E+01	752	0	- 40	0
	σf 2	0.22723 E+01	110	0	31	0
	σf 3	0.48941 E+02	1526	- 6	- 930	4
	σf 4	0.66145 E+03	1875	- 49	20	0

TABLEAU 3.10. - SUITE

Isotope	Type de réaction	Valeur de la section à $T_M^* = 306°C$ $T_C^* = 650°C$	$T_M = 200°C$ $K\infty = 1.08602$		$T_C = 1500°C$ $K\infty = 1.04365$	
			$\left(\frac{\sigma(200)}{\sigma(306)} - 1\right)10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ pcm	$\left(\frac{\sigma(1500)}{\sigma(650)} - 1\right)10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ pcm
^{242}Pu	σ a 1	0.16175 E+01	822	0	- 31	0
	σ a 2	0.46384 E+00	589	0	- 19	0
	σ a 3	0.88321 E+02	1617	0	- 581	0
	σ a 4	0.95243 E+01	6276	0	- 46	0
	σ f 1	0.15817 E+01	835	0	- 32	0
	σ f 2	0.21159 E+00	1385	0	- 123	0
	σ f 3	0.97829 E-20	- 82	0	- 121	0
	σ f 4	0.92301 E-20	- 388	0	3	0
^{135}Xe	σ a 1	0.90134 E-03	300	0	- 128	0
	σ a 2	0.15790 E-01	- 203	0	89	0
	σ a 3	0.37452 E+03	3765	0	- 1092	0
	σ a 4	0.13899 E+07	11245	277	- 108	- 3
^{149}Sm	σ a 1	0.46245 E-01	229	0	- 141	0
	σ a 2	0.10899 E+01	- 220	0	92	0
	σ a 3	0.31270 E+03	3367	0	- 1132	0
	σ a 4	0.40590 E+05	6423	40	- 76	0
Eau	σ a 1	0.97637 E-02	685	1	280	0
	σ a 2	0.29615 E-19	- 213	0	7	0
	σ a 3	0.25194 E-01	2636	10	- 651	- 2
	σ a 4	0.36572 E+00	8802	348	- 36	- 1
Bore soluble	σ a 1	0.86628 E-01	- 289	0	60	0
	σ a 2	0.41420 E+00	- 415	0	89	0
	σ a 3	0.29636 E+02	2561	12	- 621	- 3
	σ a 4	0.42295 E+03	8772	402	- 35	- 1
Produits de fission	σ a 1	0.70787 E-02	370	0	- 114	0
	σ a 2	0.72971 E-01	- 165	0	79	0
	σ a 3	0.56413 E+01	1948	36	- 787	- 17
	σ a 4	0.92868 E+01	9435	194	- 75	- 2
Corps 10	Σ a 1	0.22899 E-03	1462	3	189	0
	Σ a 2	0.10368 E-03	- 485	- 1	70	0
	Σ a 3	-0.16166 E-03	-39183	62	29408	- 54
	Σ a 4	0.27666 E-02	-10415	- 191	4250	79
	$\Sigma_{r1\to2}$	0.62758 E-01	15060	623	- 85	- 4
	$\Sigma_{r2\to3}$	0.55048 E-01	21954	- 456	136	- 3
	$\Sigma_{r3\to4}$	0.48778 E-01	26716	- 4695	- 709	156

En général les $\Delta\sigma/\sigma$ des différentes cellules varient (au plus) jusqu'à 4% (excepté le corps 10) ; cette variation est d'autant plus grande que l'isotope contribue moins au bilan de réactivité dans l'effet modérateur et le $\Delta\sigma/\sigma$ inférieur au pourcent (pour $\sigma_{a3}{}^{238}U$, $\sigma_{a3}{}^{240}Pu$ et $\Sigma_{R3\to4}$) dans l'effet Doppler.

Donc il est possible d'utiliser une même loi de variation des sections efficaces en fonction des températures du modérateur et du combustible pour toutes les compositions pour un même assemblage.

A.7 - CONCLUSION

Cette recherche des sections sensibles aux effets de températures pour les calculs ultérieurs des contre-réactions, nous permettra de réduire le nombre de sections à paramètrer en fonction de la densité d'eau et de la température du combustible. Ainsi, une "économie" supérieure à 50% pour les sections sensibles à l'effet modérateur d'environ 80 % pour les sections sensibles à l'effet Doppler peut être réalisée et atteindre une meilleure estimation des coefficients de température dans les plages de températures du modérateur et du combustible explorées. Le coût du calcul est aussi fonction du degré d'ajustement de chaque section paramétrée. En général ces ajustements ne dépassent guère le paramétrage parabolique (sauf pour $\sigma_{a3}{}^{238}U$ pour l'effet Doppler et $\sigma_4{}^{235}U$ pour l'effet modérateur). L'optimum de ces ajustements sera examiné en détail dans le paragraphe qui suit.

B - PRESENTATION DU PROGRAMME D'INTERFACE PARASITE ENTRE APOLLO ET DIANE POUR LES EFFETS DE PUISSANCE

B.1. - INTRODUCTION

Le code PARASITE a été développé pour rechercher automatiquement les sections efficaces sensibles aux effets de puissance et déterminer le degré de l'ajustement polynômial qui respecte une précision imposée ; ainsi une recherche manuelle fastidieuse est évitée.

En outre ce programme d'interface entre APOLLO et DIANE permet la structuration de bibliothèques évolutives à contre-réaction d'une façon assimilable par le code DIANE à partir des données de toutes les compositions constituant l'assemblage :

- résultats de l'évolution APOLLO dans les conditions nominales traitées par l'interface VELPO, qui exprime les variations des sections avec l'irradiation sous forme d'un polynôme ou d'une fraction rationnelle d'une quantité représentative du taux de combustion $\sigma(\tau)$. Cette paramétrisation reste inchangée par les corrections PARASITE en fonction des effets de puissance,

- issues de deux jeux de sections efficaces concernant les effets de puissance calculés par APOLLO à un taux d'irradiation convenablement choisi pour toutes les bibliothèques à contre-réaction.

Ces jeux sont traités par des ajustements polynômiaux ensuite combinés à la première série de données et restitués par le programme pour constituer la bibliothèque citée ci-dessus.

B.2. - METHODE D'AJUSTEMENT PARASITE

On rappelle que l'expression d'une section efficace dans DIANE s'écrit :

$$\sigma_{rg}^{ik}(\tau, T_m, T_c) = \sigma(\tau) \times \pi(NH_2O) \times \pi(P/P^*)$$

Le code PARASITE génère une correction multiplicative qui peut s'exprimer sous la forme suivante, en fonction des densités d'eau et de la puissance volumique locale :

$$\sigma_{rg}^{ik}(\tau_o, T_m, T_c^*) \;/\; \sigma_{rg}^{ik}(\tau_o, T_m^*, T_c^*) \;\#\# \pi(NH_2O)$$

$$\sigma_{rg}^{ik}(\tau_o, T_m^*, T_c) \;/\; \sigma_{rg}^{ik}(\tau_o, T_m^*, T_c^*) \;\#\# \pi(P/P^*)$$

où $\sigma_{rg}^{ik}(\tau_o, T_m, T_c)$ désigne une section efficace microscopique ou macroscopique de l'isotope i de réaction r dans le groupe g et dans la composition du type k. La réaction r peut être une absorption, une fission, un transfert en énergie ou un transport, produite à la température médérateur T_m et à la température combustible T_c à l'irradiation τ_o. Le symbole * indique que la constante est une grandeur de référence, qui sera conservée par la suite.

Dans le premier rapport où la correction liée à l'effet de densité du modérateur est approximée par un polynôme $\pi(NH_2O)$ fonction de la concentration des molécules d'eau NH_2O à la température T_m.

Dans le second, la correction liée à l'effet Doppler est approximée par un polynôme $\pi(P/P^*)$ fonction du rapport de la puissance spécifique P du combustible, de température T_c à la puissance de référence P^*. L'effet modérateur et l'effet Doppler sont découplés.

La variation de ces deux rapports en fonction de NH_2O et de P/P^* étant monotone (un exemple de cette variation de quelques sections importantes a été illustré dans les figures 3.1. et 3.2), on peut en première approximation se limiter à l'ajustement parabolique de $\pi(NH_2O)$ et $\pi(P/P^*)$ (ajustement cubique pour certaines sections particulièrement importantes), d'où :

$$\pi_1(NH_2O) = \alpha + \beta N_{H_2O} + \gamma N^2_{H_2O}$$

et $$\pi_2(P/P^*) = \alpha' + \beta' (P/P^*) + \gamma' (P/P^*)^2$$

B.2.1. - Détermination des coefficients d'ajustement de π_1 et π_2

Nous simplifierons l'écriture de ces rapports en omettant les indices i, k, r, g et en notant σ^* la valeur d'une section aux températures de référence.

B.2.1.1. Détermination des coefficients α, β, γ, de $\pi(NH_2O)$

A la température de référence T^*_m , $N_{H_2O} = N^*_{H_2O}$

$$\pi(NH^*_2O) = \alpha + \beta N^*_{H_2O} + \gamma N^{*2}_{H_2O} = 1$$

$$\alpha = 1 - \beta N^*_{H_2O} - \gamma N^{*2}_{H_2O}$$

soit :

$$\pi(NH_2O) = 1 + \beta (N_{H_2O} - N^*_{H_2O}) + \gamma (N^2_{H_2O} - N^{*2}_{H_2O})$$

B.2.1.2. - Détermination des coefficients α', β', γ' de $\pi(P/P^*)$

A la température de référence T^*_c , $P = P^*$

$$\pi(1) = \alpha' + \beta' + \gamma' = 1$$

$$\alpha' = 1 - \beta' - \gamma'$$

$$\pi(P/P^*) = 1 + \beta' \left[\frac{P}{P^*} - 1 \right] + \gamma' \left[\left(\frac{P}{P^*}\right)^2 - 1 \right]$$

$$\pi\left(\frac{P}{P^*}\right) = 1 + \beta'' (P - P^*) + \gamma'' (P^2 - P^{*2})$$

avec : $\beta'' = \beta'/P^*$ et $\gamma'' = \gamma'/P^{*2}$

ce qui réduit le nombre d'inconnues à deux. D'une manière générale on écrit :

$$\pi_i \ (i = 1\ \pi_1 = \pi(NH_2O)\ ;\ i = 2\ \pi_2 = \pi(P/P^*))$$

$$\frac{\sigma}{\sigma^*} \# \pi_i = 1 + \beta\,(X - X^*) + \gamma\,(X^2 - X^{*2}) \text{ où X peut être } N_{H_2O} \text{ ou P.}$$

Les coefficients β et γ sont déterminés de façon à réduire l'écart entre π_i et σ/σ^* au sens des moindres carrés dans les autres états de températures. La connaissance de β et γ permet de trouver α.

On pose $r_\theta = \frac{\sigma_\theta}{\sigma^*}$ où θ indice de température autre que la température de référence.

$$\sum_\theta \left(\left[1 + \beta\,(X_\theta - X^*) + \gamma\,(X_\theta^2 - X^{*2}) \right] - r_\theta \right)^2 \text{ doit être minimum.}$$

Soit en dérivant par rapport à β et γ nous avons :

$$\sum_\theta (1 - r_\theta + \beta\,(X_\theta - X^*) + \gamma\,(X_\theta^2 - X^{*2}))\,(X_\theta - X^*) = 0 \text{ et}$$

$$\sum_\theta (1 - r_\theta + \beta\,(X_\theta - X^*) + \gamma\,(X_\theta^2 - X^{*2}))\,(X_\theta^2 - X^{*2}) = 0$$

Finalement, on aboutit au système d'équations :

$$\begin{cases} \beta \sum_\theta (X_\theta - X^*)^2 + \gamma \sum_\theta (X_\theta - X^*)^2\,(X_\theta - X^*) = \sum_\theta (r_\theta - 1)\,(X_\theta - X^*) \\ \beta \sum_\theta (X_\theta - X^*)^2\,(X_\theta - X^*) + \gamma \sum_\theta (X_\theta^2 - X^{*2})^2 = \sum_\theta (r_\theta - 1)\,(X_\theta^2 - X^{*2})^2 \end{cases}$$

dont on peut déduire β et γ et par conséquent α. Le poids est égal à un à toutes les températures.

Il va falloir limiter le nombre de sections à ajuster de manière systèmatique ; ceci est réalisable, si on peut définir un critère de précision sur la section pour chaque type de réaction étant donné une marge d'incertitude sur la réactivité ε.

B.2.2. - Conversion d'une précision sur la réactivité en précision sur la section

L'erreur admissible ε sur la réactivité d'un assemblage donné est convertie en un critère de précision sur σ (indépendant de la composition pour une section donnée). Une valeur supérieur à $\Delta\sigma/\sigma$ induit une incertitude sur la réactivité plus grande que ε. La conversion dépend :

- de la nature de la réaction
  . absorption ou fission
  . transport
  . transfert

- du fait qu'il s'agisse du corps 10 ou non.

Pour ce but PARASITE emploie la formule du facteur de multiplication (avec fuites DB^2)

$$\lambda = \frac{\sum_g \sum_i \sum_k N_{ik} \nu_i^g \sigma_{fki}^g \Phi_K^g}{\sum_g \sum_i \sum_k (N_{ik} \sigma_{aki}^g + D_K^g B_K^2) \Phi_K^g} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} < \varepsilon \qquad (3)$$

Les indices qui figurent dans cette formule sont :

g = numéro de groupe

i = isotope pour lequel $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ est calculé

k = indice de composition

N_i = nombre de noyaux de l'isotope i

B_K^2 et Φ_K^g sont respectivement le laplacien critique et le flux intégré sur le volume de la cellule, issus du calcul APOLLO de référence. L'introduction de ces grandeurs en plus de la bibliothèque de référence, permet à PARASITE de calculer la valeur de λ. Le numérateur et le dénominateur dans cette expression sont voisins de l'unité du fait de la normalisation du flux dans APOLLO.

B.2.2.1. Cas général

Ce cas concerne toutes les sections d'absorption et de fission de tous les isotopes à l'exception du corps 10

$$\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right)_i^g = \frac{\varepsilon}{\sum_K N_{ki} \nu\sigma_{ki}^g \Phi_k^g} \quad \text{dans le cas d'une absorption } \nu = 1$$

B.2.2.2. Absorption du corps 10

$$\left(\frac{\Delta\Sigma}{\Sigma}\right)_{10}^g = \frac{\varepsilon}{\sum_K \Sigma_{K10}^g \Phi_K^g}$$

B.2.2.3. - Transport du corps 10

$$\left(\frac{\Delta\Sigma}{\Sigma} \right)_{10}^{g} = \frac{\varepsilon}{\sum_{K} \frac{B^2}{3 \sum_{10}^{g}} \Phi_K^g}$$

B.2.2.4. - Transfert du corps 10

Le formalisme utilisé ne permet pas de déduire simplement $\frac{\Delta\Sigma R^g}{\Sigma R^g}$ pour ce type de section, car elle n'apparait pas explicitement dans l'expression (3) de λ, mais dépend implicitement des rapports des flux. En revanche, dans l'expression (2) du paragraphe précédent, les sections de transfert figurent explicitement, il suffit de moyenner toutes les sections sur l'assemblage par les flux et d'ajouter aux absorptions les fuites sous forme de $D^g B_K^2$. La différentiation de (3) donne le poids de chaque Σ_R^g. En fait un premier calcul de λ donne une valeur critique dans les conditions de référence ; en majorant successivement les trois valeurs de Σ_R^g de 1% induisent des écarts de réactivités Δ^g et la tolérance sur chaque Σ_R^g s'écrit :

$$\left(\frac{\Delta\Sigma R}{\Sigma_R} \right)_{10}^{g} = \frac{\varepsilon}{\Delta g} \times 0{,}01$$

Une optimisation du nombre et du degré des ajustements pour une meilleure précision peut être obtenue en agissant sur la valeur de ε. Dans le paragraphe qui suit, il sera question de cette optimisation dans le but de respecter une marge d'incertitude sur le coefficient de puissance.

B.3. - CONCLUSION

PARASITE est un code d'interface entre APOLLO et DIANE, traitant le problème des contre-réactions. Il a pour but de lisser les rapports des sections efficaces microscopiques et macroscopiques issues des bibliothèques APOLLO, par la méthode des moindres-carrés. Ces rapports sont de la forme $\sigma(\tau_o, T_m, T_c^*) / \sigma(\tau_o, T_m^*, T_c^*)$ et $\sigma(\tau_o, T_m^*, T_c) / \sigma(\tau_o, T_m^*, T_c^*)$ où le numérateur est la valeur de la section à l'une des températures variables T_m ou T_c lorsque l'autre température est constante et fixée à celle de référence (marquée par une étoile). Le dénominateur commun de ces rapports représente la valeur de la section aux températures de référence T_m^* et T_c^*. Il y a donc un découplage des effets modérateur et Doppler.

L'ajustement de ces rapports est réalisé respectivement en fonction de la concentration de l'eau N_{H_2O} à la température T_m et en fonction du rapport P/P^* de la puissance spécifique du combustible de température T_c à la puissance spécifique de référence P^*, τ_o est une irradiation quelconque.

On compte parmi les possibilités de PARASITE :

- la sélection du polynôme de plus bas degré choisi entre zéro et trois, donnant le meilleur ajustement.

Cette sélection est liée au critère de précision imposé pour chaque section et chaque groupe qui respecte une marge d'incertitude sur la réactivité.

- Le nombre de groupes d'énergie peut être égal à deux ou quatre.

- Le nombre de températures modérateurs doit être supérieur ou égal à deux, et également pour la température combustible. Cependant le nombre de températures modérateur peut être différent de celui des températures combustible.

- Une restitution finale d'une bibliothèque de structure assimilable par le code DIANE. Elle comporte les coefficients d'ajustement des sections en fonction de l'irradiation (ceux de VELPO) et les coefficients propres à PARASITE qui sont précédés par un mot clé suivant qu'il s'agit d'un effet modérateur ou d'un effet Doppler.

- La correction dûe à ces deux effets est construite de façon à s'annuler aux températures de référence.

C - *COMPARAISONS DE RESULTATS RELATIFS A DES AJUSTEMENTS OBTENUS AVEC DIFFERENTES PRECISIONS*

C.1. - INTRODUCTION

Nous examinons pour différentes valeurs de ε_i = (100, 50, 30, 10 pcm) l'évolution du :

- nombre de sections paramétrées en fonction des températures du modérateur et du combustible,
- degré polynomial de chaque section paramétrée,
- temps du calcul de diffusion avec contre-réaction en fonction de ε_i.

Les comparaisons se feront à toutes les températures du modérateur et du combustible sur le coefficient de température entre les calculs DIANE et APOLLO. La meilleure précision obtenue avec l'un des ε_i sur le coefficient modérateur et le coefficient Doppler sera retenue, sachant que les précisions souhaitables doivent correspondre respectivement à 1 pcm/°C entre les températures du modérateur (286 - 306°C) et 20 pcm entre 0 et 100% de la puissance nominale (c'est à dire entre T_c = 286 et T_c = 650°C, soit 1000 pcm sur la réactivité).

C.2. - COMPARAISONS DES RESULTATS OBTENUS AVEC LES DIFFERENTS AJUSTEMENTS

Ces tests sont effectués sur l'assemblage enrichi à 3.1% sans poison à 12000 MWJ/T, avec un titre en bore égal à 600 ppm. Les calculs DIANE sont faits avec la symétrie quart d'assemblage en milieu infini, la puissance nominale correspondante est P^* = 109.7 watt/cm^3. Les températures de référence sont T_m^* = 306°C et T_c^* = 650°C pour le calcul des coefficients de puissance.

Les tableaux de 3.11 à 3.14 rendent compte de l'évolution de la précision sur le coefficient de puissance en fonction de la valeur de ε_i. La précision sur le coefficient Doppler (inférieure à 20 pcm) n'est atteinte que pour ε_i = 10 pcm. Pour le modérateur, la précision atteinte augmente quand on durcit le critère de ε. Le coefficient de température du modérateur est finalement sur-estimé de 0,2 pcm/°C en valeur absolue quand ε = 10 pcm. Il est à remarquer qu'une augmentation de la précision du paramétrage de PARASITE (diminution de la valeur de ε) ne conduit pas forcément à améliorer la précision sur le coefficient de température. Ceci vient du fait que les erreurs résiduelles bien que d'amplitude ε plus faible, peuvent moins bien se compenser que dans un calcul précédent avec ε plus grand. Cette dégradation de la précision apparait chaque fois que le programme sélectionne une section de fission parmi les sections importantes à paramètrér et ne retient pas la section d'absorption correspondante d'importance légèrement moindre. A titre d'exemple, l'utilisation d'un paramétrage effectué avec la précision ε = 50 pcm au lieu du paramétrage correspondant à ε = 100 pcm fait perdre 97 pcm sur la réactivité à T_c = 1500°C. L'examen du tableau 3.15 montre en effet que le durcissement de 100 à 50 pcm du critère de précision sur ε a conduit à ajouter les ajustements des sections de fission épithermique de l'^{235}U et d'absorption thermique du corps 10. Leurs contributions respectives dans le bilan de réactivité étaient de + 52 et + 60 pcm pour ε = 100 pcm et qui devient - 5 et + 7 pcm soit une chute de réactivité de - 110 pcm qui est proche de la valeur - 97 pcm.

TABLEAU 3.11. : ε = 100 pcm

Assemblage : 3.1% SP - τ_o = 12000 MWJ/T 600 ppm de bore

Comparaisons des coefficients de température entre DIANE (avec activation) et APOLLO

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	K∞D DIANE	K∞A APOLLO	$\frac{K\infty D - K\infty A}{K\infty A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE pcm/°C	$C\theta_A$ APOLLO pcm/°C	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.08734	1.08624	+ 101	- 11.98	- 10.12	- 1.86
286	650	1.07830	1.07918	- 82	- 21.75	- 20.80	- 0.95
306	650	1.07362	1.07471	- 102			
320	650	1.06918	1.07033	- 108	- 29.60	- 29.11	- 0.49
340	650	1.05787	1.05926	- 131	- 43.47	- 42.28	- 1.19
					$C\theta_D \times \Delta T$ pcm	$C\theta_A \times \Delta T$ pcm	$(C\theta_D - C\theta_A) \times \Delta T$
306	200	1.08685	1.08889	- 188	1225	1311	- 86
306	286	1.08423	1.08628	- 189	983	1071	- 88
306	650	1.07362	1.07471	- 102			
306	850	1.06841	1.06977	- 127	- 486	- 461	- 25
306	1500	1.05415	1.05500	- 81	-1830	- 1851	+ 21

$$C\theta = \frac{K\infty(T) - K\infty^{*}}{K\infty^{*}} \times \frac{1}{T - T^{*}} \times 10^{+5}$$

$$\Delta T = (T_c - 650)°C$$

TABLEAU 3.12. : ε = 50 pcm

Assemblage : 3.1% SP - τ_0 = 12000 MWJ/T 600 ppm de bore

Comparaisons des coefficients de température entre DIANE (avec activation) et APOLLO

Température modérateur (°c)	Température combustible (°C)	$K\infty D$ DIANE	$K\infty A$ APOLLO	$\frac{K\infty D - K\infty A}{K\infty A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE pcm/°C	$C\theta_A$ APOLLO pcm/°C	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.08874	1.08624	+ 230	- 13.19	- 10.12	- 3.07
286	650	1.07793	1.07918	- 116	- 20.03	- 20.80	0.77
306	650	1.07362	1.07471	- 102			
320	650	1.06940	1.07033	- 87	- 28.13	- 29.11	0.98
340	650	1.05753	1.05926	- 163	- 44.41	- 42.28	- 2.13
					$C\theta_D \times \Delta T$ pcm	$C\theta_A \times \Delta T$ pcm	$(C\theta_D - C\theta_A) \times \Delta T$
306	200	1.08741	1.08889	- 136	1276	1311	- 35
306	286	1.08469	1.08628	- 146	1026	1071	- 45
306	650	1.07362	1.07471	- 102			
306	850	1.06817	1.06977	- 150	- 509	- 461	- 48
306	1500	1.05313	1.05500	- 177	- 1927	- 1851	- 78

$$C\theta = \frac{K\infty(T) - K\infty^*}{K\infty^*} \times \frac{1}{T - T^*} \times 10^{+5}$$

$$\Delta T = (T_c - 650)°C$$

TABLEAU 3.13. : ε = 30 pcm

Assemblage : 3.1% SP - τ_o = 12000 MWJ/T 600 ppm de bore

Comparaisons des coefficients de température entre DIANE (avec activation) et APOLLO

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	K∞D DIANE	K∞A APOLLO	$\frac{K\infty D - K\infty A}{K\infty A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE pcm/°C	$C\theta_A$ APOLLO pcm/°C	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.08757	1.08624	+ 122	- 12.18	- 10.12	- 2.06
286	650	1.07797	1.07918	- 112	- 20.22	- 20.80	0.58
306	650	1.07362	1.07471	- 102			
320	650	1.06925	1.07033	- 101	- 29.13	- 29.11	- 0.02
340	650	1.05687	1.05926	- 226	- 46.25	- 42.28	- 3.97
					$C\theta_D \times \Delta T$ pcm	$C\theta_A \times \Delta T$ pcm	$(C\theta_D - C\theta_A) \times \Delta T$
306	200	1.08779	1.08889	- 101	1311	1311	0
306	286	1.08482	1.08628	- 134	1038	1071	- 33
306	650	1.07362	1.07471	- 102			
306	850	1.06845	- 123	- 123	- 483	- 461	- 22
306	1500	1.05349	1.05500	- 143	- 1893	- 1851	- 42

$$C\theta = \frac{K\infty(T) - K\infty^{*}}{K\infty^{*}} \times \frac{1}{T - T^{*}} \times 10^{+5}$$

$$\Delta T = (T_c - 650)°C$$

TABLEAU 3.14 : ε = 10 pcm

Assemblage : 3.1% SP - τ_0 = 12000 MWJ/T 600 PPm de bore

Comparaisons des coefficients de température entre DIANE (avec activation) et APOLLO

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	$K\infty D$ DIANE	$K\infty A$ APOLLO	$\frac{K\infty D - K\infty A}{K\infty A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE pcm/°C	$C\theta_A$ APOLLO pcm/°C	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.08638	1.08624	+ 13	- 11.21	- 10.12	- 1.09
286	650	1.07813	1.07918	- 97	- 21.00	- 20.80	- 0.20
306	650	1.07362	1.07471	- 102			
320	650	1.06919	1.07033	- 107	- 29.47	- 29.11	- 0.36
340	650	1.05742	1.05926	- 174	- 44.28	- 42.28	- 2.00
					$C\theta_D \times \Delta T$ pcm	$C\theta_A \times \Delta T$ pcm	$(C\theta_D - C\theta_A) \times \Delta T$
306	200	1.08806	1.08889	- 76	1336	1311	25
306	286	1.08501	1.08628	- 117	1055	1071	- 16
306	650	1.07326	1.07471	- 102			
306	850	1.06841	1.06977	- 127	- 486	- 461	- 25
306	1500	1.05369	1.05500	- 124	- 1874	- 1851	- 23

$$C\theta = \frac{K\infty(T) - K\infty^*}{K\infty^*} \times \frac{1}{T - T^*} \times 10^{+5}$$

$$\Delta T = (T_C - 650)°C$$

TABLEAU 3.15. - EVOLUTION DU DEGRE DE L'AJUSTEMENT EN FONCTION DE LA PRECISION ε (pcm)

IMPOSEE SUR LA REACTIVITE (L = LINEAIRE ; P = PARABOLIQUE ; C = CUBIQUE)

Isotope	Type de réaction	Effet modérateur T_M = 200-286-306-320-340°C				Effet Doppler T_C = 200-286-650-850-1500°C			
		ε = 100	ε = 50	ε = 30	ε = 10	ε = 100	ε = 50	ε = 30	ε = 10
^{235}U	σ a 1								
	σ a 2								
	σ a 3		L	L	P			L	L
	σ a 4	P	P	P	C				L
	σ f 1								
	σ f 2								
	σ f 3	L	L	L	P		L	L	L
	σ f 4	P	C	C	C				L
^{238}U	σ a 1			L	L				
	σ a 2							L	P
	σ a 3	L	P	P	P	P	P	C	C
	σ a 4	L	P	P	P				
	σ f 1		P	L	L				
	σ f 2								
^{236}U	σ a 1								
	σ a 2								
	σ a 3				L				
	σ a 4								
^{239}Pu	σ a 1								
	σ a 2								
	σ a 3				L				
	σ a 4	L	P	P	P				L
	σ f 1								
	σ f 2								
	σ f 3				L				L
	σ f 4	P	P	P	P				L
^{240}Pu	σ a 1								
	σ a 2								
	σ a 3	L	L	L	P	L	L	P	P
	σ a 4				L				
^{241}Pu	σ a 1								
	σ a 2								
	σ a 3								
	σ a 4				L				
	σ f 1								
	σ f 2								
	σ f 3								
	σ f 4			L	L				

TABLEAU 3.15. - SUITE

Isotope	Type de réaction	Effet modérateur T_M = 200-286-306-320-340°C				Effet Doppler T_C = 200-286-650-850-1500°C			
		ε = 100	ε = 50	ε = 30	ε = 10	ε = 100	ε = 50	ε = 30	ε = 10
^{242}Pu	σ a 1								
	σ a 2								
	σ a 3								
	σ a 4								
	σ f 1								
	σ f 2								
	σ f 3								
	σ f 4								
^{135}Xe	σ a 1								
	σ a 2								
	σ a 3								
	σ a 4	L	L	L	P				
^{149}Sm	σ a 1								
	σ a 2								
	σ a 3								
	σ a 4				L				
Eau	σ a 1								
	σ a 2								
	σ a 3				L				
	σ a 4	L	L	P	P				
Bore soluble	σ a 1								
	σ a 2								
	σ a 3				L				
	σ a 4	L	L	P	P				
Produits de fission	σ a 1								
	σ a 2								
	σ a 3			L	L				L
	σ a 4	L	L	L	P				
Corps 10	Σtr 1	L	L	L	L				L
	Σtr 2	L	L	L	L				
	Σtr 3	L	L	L	L				
	Σtr 4		L	L	L				
	Σ a 1								
	Σ a 2								
	Σ a 3		P	P	P			L	P
	Σ a 4	L	L	P	P		L	L	P
	$\Sigma_{R1\to2}$	L	L	L	L				
	$\Sigma_{R2\to3}$	L	L	L	L				
	$\Sigma_{R3\to4}$	L	L	L	P	L	L	L	P

La précision de 20 pcm sur le coefficient Doppler intégré entre 286 et 650°C n'est atteinte que pour ε = 10 pcm.

C.3. - PROPORTION DES SECTIONS AJUSTEES

Le tableau 3.16 récapitulatif montre pour l'effet modérateur (EFF.MOD) et l'effet Doppler (EFF.DOP) en fonction des valeurs de ε :

- le nombre de types d'ajustement : linéaires (L), paraboliques (P) et cubiques (C),
- le nombre total des ajustements pour chacun des effets et le pourcentage correspondant,
- le nombre total des ajustements des effets modérateur et Doppler.

On rappelle que le nombre total des sections par composition fissile est de 77 y compris les sections de transport et que le tableau 3.16 est relatif à la cellule périphérique.

Une augmentation de la précision sur ε se traduit par un accroissement du nombre de sections dépendantes de l'effet modérateur et des sections dépendantes de l'effet Doppler dans des proportions qui décroissent avec la valeur de ε. Ainsi dans le tableau 3.16 le nombre de sections sensibles à l'effet modérateur est plus grand que celles qui sont sensibles à l'effet Doppler d'un facteur 6 pour ε = 100 pcm. Le facteur se réduit à 2 pour ε = 10 pcm. Autrement dit lorsqu'on passe de la précision ε = 100 pcm à ε = 10 pcm, le nombre de corrections liées à la densité d'eau double et le nombre de corrections liées à l'effet Doppler augmente de 5 fois ; ceci permet de confirmer (d'ailleurs comme on l'a constaté sur les résultats DIANE) qu'au fur et à mesure que l'on augmente la sévérité du paramétrage l'amélioration des résultats concerne beaucoup plus ceux qui dépendent de l'effet Doppler que ceux qui dépendent de l'effet modérateur. En effet, le paramètrage cubique de $\sigma_{a3}^{238}U$ est atteint à ε = 30 pcm ainsi que le paramétrage parabolique de σ_{a3}^{240Pu} pour l'effet Doppler, alors que pour l'effet modérateur, à ε = 50 pcm le degré de la plupart des corrections importantes est à saturation. Le durcissement du critère à ε = 10 pcm permet d'augmenter le degré de certains ajustements et de prendre en compte les corrections de certaines réactions dans le groupe 3 (eau, bore, ^{239}Pu) et le groupe 4 (^{235}U, ^{239}Pu) respectivement pour les effets du modérateur et du Doppler.

Type d'ajustement \ ε (pcm)	100		50		30		10	
	EFF.MOD	EFF.DOP	EFF.MOD	EFF.DOP	EFF.MOD	EFF.DOP	EFF.MOD	EFF.DOP
L	16	2	16	4	16	6	19	9
P	3	1	6	1	9	1	13	5
C	0	0	1	0	1	1	2	1
Total	19 (25%)	3 (4%)	23 (30%)	5 (6%)	26 (34%)	8 (10%)	34 (44%)	15 (19%)
Total	22		28		34		49	

TABLEAU 3.16

C.4. - TEMPS DE CALCUL

Le tableau 3.17. montre pour chaque ε_i, le temps en centième de seconde, consacré par DIANE pour le calcul des sections macroscopiques en contre-réaction, ainsi que le nombre de ces itérations nécessaires pour atteindre la convergence sur la puissance imposée qui est de 10^{-9}. Le temps consacré par le calcul DIANE dans le cas sans contre-réaction (assemblage 3.1% SP) est de 28 centièmes de seconde pour la partie macroscopique et 20 centièmes de seconde pour le calcul de diffusion. Dans le calcul avec contre-réaction le temps consacré pour le calcul de diffusion par itération est de l'ordre de $13/100^{\text{ème}}$ de seconde.

CALCUL \ ε (pcm)	100		50		30		10	
	EFF.MOD	EFF.DOP	EFF.MOD	EFF.DOP	EFF.MOD	EFF.DOP	EFF.MOD	EFF.DOP
Macroscopiques	25	5	30	13	32	17	39	22
Nombre d'itérations	3	2	4	2	4	2	4	2

TABLEAU 3.17

Les sections déclarées dépendantes des effets de contre-réactions, sont recalculées à chaque itération de puissance du calcul DIANE. Le coût de chacune de ces itérations correspond essentiellement au recalcul des sections macroscopiques activées et au calcul de diffusion.

Le coût de calcul des sections macroscopiques dépend autant du nombre des sections activées que de la nature et de la fréquence des corrections. En effet, pour chaque type de sections activées, DIANE recherche les sections paramètrées par un test sytèmatique sur tous les corps. Ce travail de test s'ajoute au sur-coût lié au simple calcul des quelques sections déclarées dépendantes des effets de contre-réactions. Le temps de calcul des sections macroscopiques indiqué dans le tableau 3.17 correspond au calcul de toutes les sections dépendantes des effets de température.

Lorsque les deux effets de contre-réactions sont activés, dans chacune des itérations sur la distribution de puissance, le temps de calcul des sections macroscopiques en général est inférieur à la somme des temps partiels de chacun des effets (car le calcul en fonction de τ est fait une seule fois), le temps de calcul de diffusion ne change pas. L'exemple suivant de la bibliothèque (ajustée avec ε = 10 pcm) : $41/100^{\text{ème}}$ pour la partie macroscopique et la précision sur la distribution de puissance (10^{-9}) est atteinte seulement au bout de deux itérations (quelle que soit la puissance à laquelle l'activation des deux effets est faite, deux itérations sont suffisantes pour converger). Le calcul de diffusion demande $17/100^{\text{ème}}$ de seconde par itération. Le temps de calcul des sections macroscopiques en activant les deux effets avec l'une des bibliothèques ajustée avec la précision ε = (100, 50 et 30) est presque constant et égal à $30/100^{\text{ème}}$ de seconde.

C.5. - CONCLUSION

Une estimation du coefficient de température pourrait être obtenue avec une précision de 30 pcm sur chaque section au lieu d'utiliser un ajustement correspondant à un critère sévère de 10 pcm. Cependant le gain en temps de calcul n'est pas important (10 centièmes de secondes) devant la précision obtenue avec le critère ε = 10 pcm qui est de 0,2 pcm pour le coefficient modérateur et pourrait être nul pour le coefficient Doppler si l'on tient compte du spectre Doppler dans les trous d'eau. Ce point sera étudié plus en détail dans le chapitre suivant.

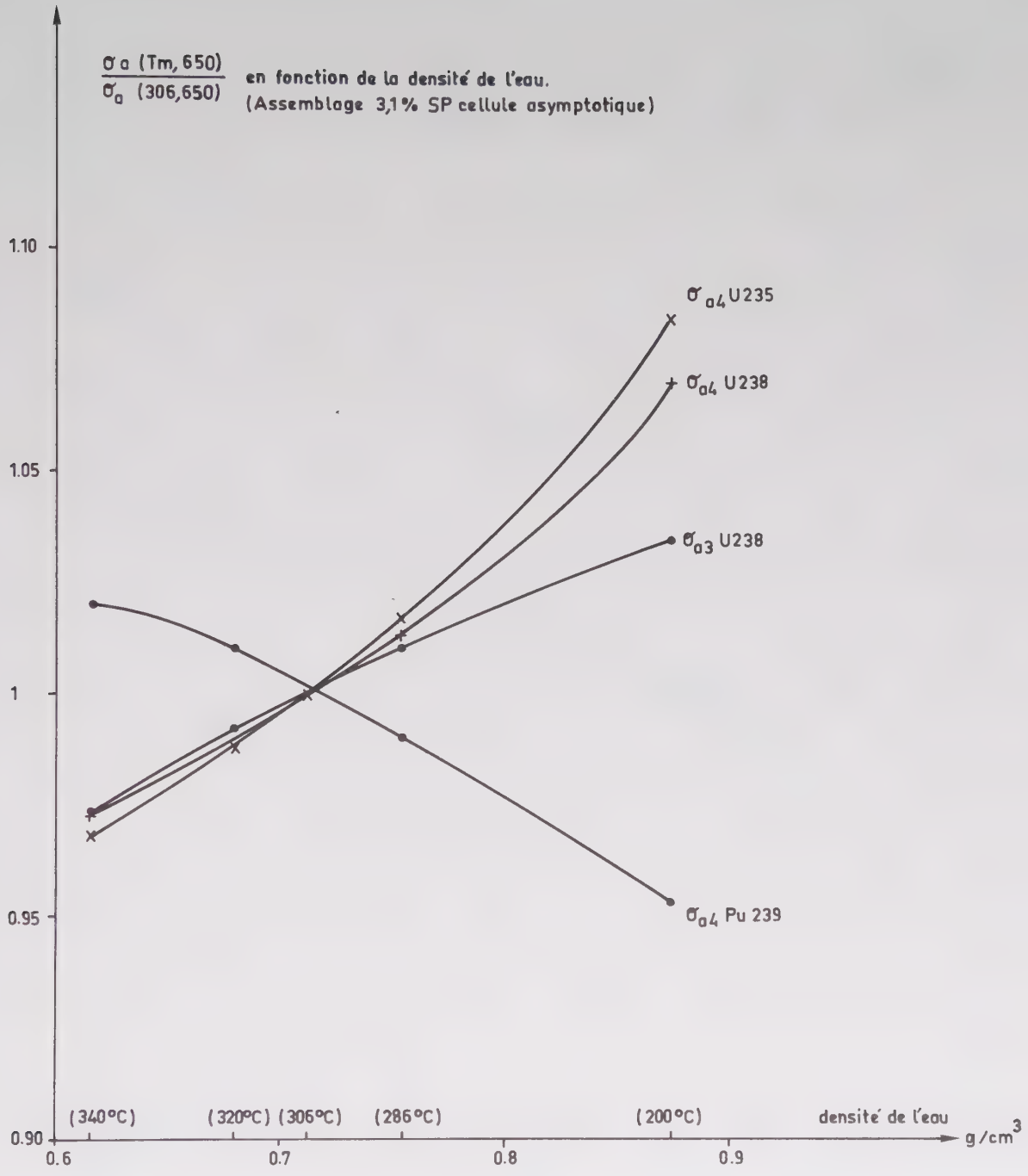

σa (Tm, 650) / σa (306,650) en fonction de la densité de l'eau.
(Assemblage 3,1 % SP cellule asymptotique)
1.10
1.05
1
0.95
0.90
σa4 U235
σa4 U238
σa3 U238
σa4 Pu 239
(340°C)
(320°C)
(306°C)
(286°C)
(200°C)
densité de l'eau
g/cm3
0.6
0.7
0.8
0.9

Fig. 3_1

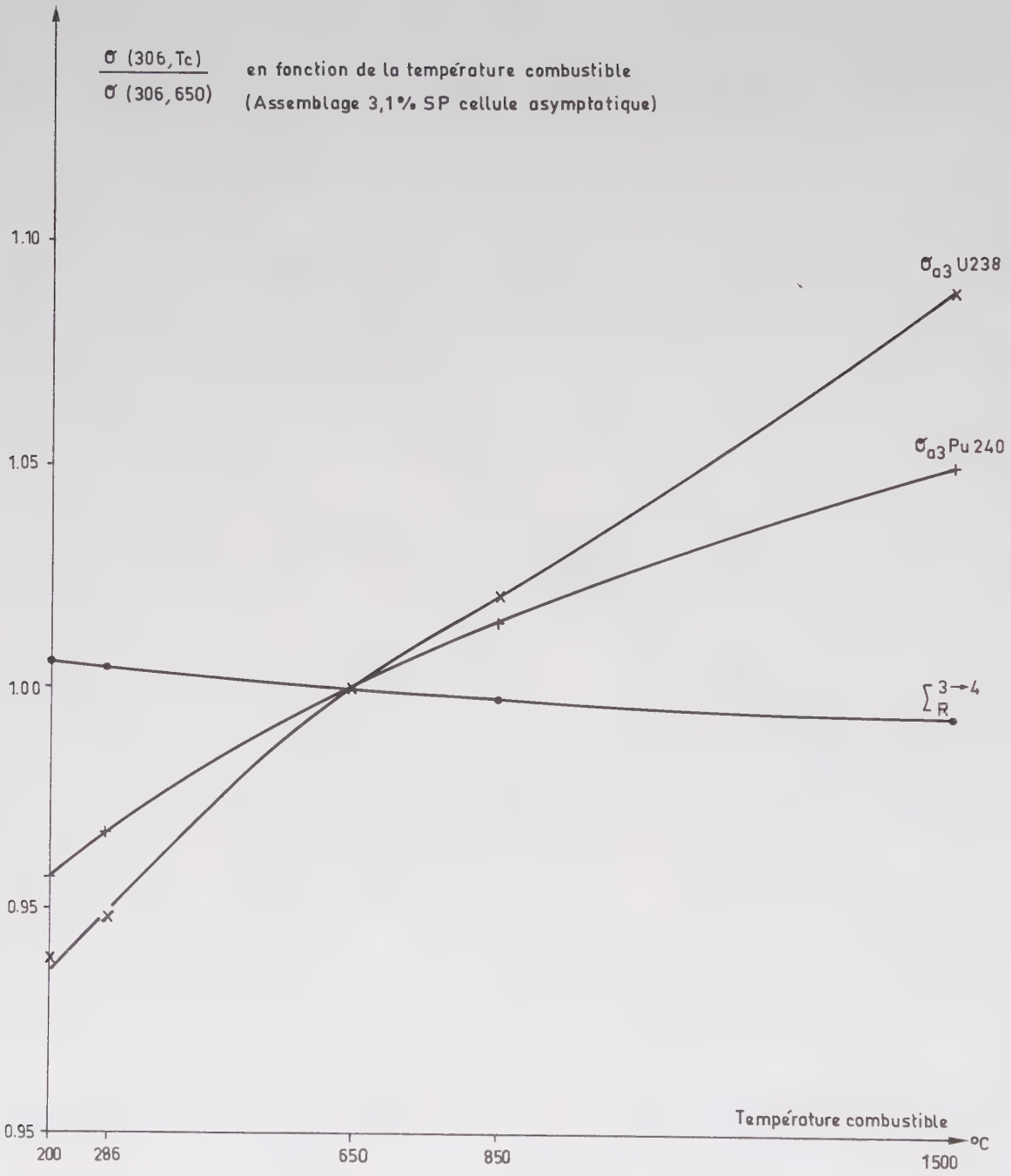

σ (306, Tc) / σ (306, 650) en fonction de la température combustible
(Assemblage 3,1% SP cellule asymptotique)
1.10
1.05
1.00
0.95
0.95
σa3 U238
σa3 Pu 240
∫ 3→4 R
Température combustible
°C
200
286
650
850
1500

Fig. 3_2

CHAPITRE IV

COMPARAISONS DES CALCULS DE CONTRE-REACTIONS SUR DES ASSEMBLAGES ENTRE DIANE ET APOLLO

IV.1. INTRODUCTION

L'exposé au chapitre III des résultats DIANE concernant le calcul des effets modérateur et Doppler pour l'assemblage enrichi à 3.1 % sans poison, a montré les possibilités du code PARASITE. Nous en avons déduit la précision à employer dans les autres calculs d'assemblages pour le paramétrage des corrections liées aux effets de température.

Les thèmes qui seront abordés dans ce chapitre, spécifient les conditions de réalisation des bibliothèques évolutives à contre-réaction à partir des différents codes d'interface ; ces thèmes sont les suivants :

- ajustement des taux de réaction dans les hétérogénéités locales, par le code EQUIPAGE, pour réaliser l'équivalence Transport-Diffusion
- représentation des sections efficaces en fonction de l'usure du combustible, par le code VELPO et la précision des résultats obtenus sur différentes bibliothèques
- paramètres nécessaires au code PARASITE pour l'ajustement des corrections en fonction de l'effet modérateur et l'effet Doppler ; la précision atteinte aux différentes températures de chaque section paramétrée par PARASITE (paramétrage des sections efficaces en fonction de la température).

Nous analysons l'incertitude obtenue, à chaque température, sur la réactivité et les coefficients de température dans les conditions nominales d'irradiation où la paramétrisation en fonction des effets de température a été effectuée. Des situations différentes de ces conditions sont examinées pour valider les hypothèses simplificatrices des contre-réactions annoncées au début du chapitre précédent :

- l'influence de l'irradiation
- l'effet de la concentration en bore soluble sur les corrections établies dans les conditions nominales
- le couplage des effets de température du modérateur et du combustible.

Ces comparaisons font appel à d'autres calculs DIANE de référence (baptisés PONCTUELS) et à des calculs APOLLO.

IV.2. TRAITEMENT DES BIBLIOTHEQUES

Les constantes neutroniques à quatre groupes d'énergie sont obtenues pour chaque assemblage par un calcul d'évolution multicellule APOLLO en milieu infini avec un titre moyen en bore égal à 600 ppm et à 100% de la puissance nominale. L'évolution est faite de 0 à 52000 MWJ/t pour l'assemblage enrichi à 3.1% sans poison et seulement jusqu'à 24 000 MWJ/t pour les autres assemblages dans les conditions nominales $T_m^* = 306$ et $T_c^* = 650°C$. Chaque calcul d'évolution APOLLO est réalisé par pas d'irradiation de 3 ou 4000 MWJ/t. Un pas intermédiaire entre 0 et 1000 MWJ/t est utilisé, celui de 150 MWJ/t. Tous ces calculs sont faits avec saturation du Xénon, et l'autoprotection de l'^{235}U et l'^{238}U calculée au temps zéro est imposée en évolution. Les bibliothèques à contre-réaction sont constituées dans les conditions citées au paragraphe III.A.2 en

tenant compte du calcul d'autoprotection de l'^{235}U, l'^{238}U et du ^{239}Pu à chaque température.

Pour réaliser un calcul de diffusion-évolution à contre-réaction avec DIANE, il est nécessaire d'effectuer les opérations suivantes dont nous avons exposé le principe au chapitre II :

- les sections d'absorption des cellules poison des assemblages enrichis à 2.6 et 3.1 % sont ajustées par EQUIPAGE pour rendre compte de l'équivalence Transport-Diffusion aux différents taux d'irradiation qui constituent l'évolution. Les cellules trou d'eau ne seront pas ajustées
- ensuite, la dépendance des sections vis à vis de l'usure du combustible est représentée par un polynôme ou une fraction rationnelle fonction du rapport $N_{235_U}(t)/N_{235_U}(0)$ des noyaux de l'^{235}U à l'instant t et l'instant zéro.

Un exemple sur la précision obtenue sur la réactivité par le lissage VELPO des sections en fonction de l'irradiation est donné par le tableau 4.1. Cet exemple porte uniquement sur les assemblages les plus courants où l'évolution est faite à partir du temps t=0 jusqu'au délà de la fin du premier cycle.

D'une manière générale, le lissage VELPO conduit à une sous-estimation de la réactivité et l'erreur ne conserve pas une amplitude constante ; elle peut atteindre 80 pcm. En réalité ces calculs de diffusion-évolution effectués par DIANE ne correspondent pas à de vrais calculs d'évolution mais à de simples calculs de diffusion effectués aux différents taux d'irradiation. En effet pour pouvoir attribuer l'incertitude sur la réactivité par l'ajustement des sections en fonction de l'irradiation, les concentrations des noyaux évoluants à un pas de l'évolution sont des concentrations moyennes produites par APOLLO. Ainsi l'erreur supplémentaire sur la réactivité qui pourrait être due à la différence de ces concentrations entre les calculs DIANE et APOLLO est écartée.

En raison du problème que présente les produits de fission en début de vie (le Rhodium dans notre cas), lors des calculs DIANE utilisant une bibliothèque paramétrée par VELPO, la valeur propre k_∞ donnée par DIANE est corrigée à toute température d'une même quantité correspondante à l'antiréactivité du Rhodium (valeurs approximatives fournies par APOLLO) :

. assemblage enrichi à 2.1 % 50 pcm
. " " à 2.6 % 16 pyrex 43 pcm
. " " à 3.1 % sans poison 40 pcm

IV.3. UTILISATION ET RESULTATS DU CODE PARASITE

IV.3.1. Utilisation

L'ajustement des sections efficaces microscopiques et macroscopiques en fonction des effets de puissance est réalisé à mi-cycle du coeur correspondant à l'irradiation 12 000 MWJ/t. Cet ajustement sera utilisé durant tout le cycle.

TABLEAU 4.1 :

Evolution de la précision VELPO en fonction du taux d'irradiation

Assemblage / Irradiation (MWJ/t)	2.1 % SP			3.1 % SP			2.6 % 16 BP		
	$k_\infty(1)$	$k_\infty(2)$	$\Delta K_\infty/K_\infty$ (pcm)	$k_\infty(1)$	$k_\infty(2)$	$\Delta K_\infty/K_\infty$ (pcm)	$k_\infty(1)$	$k_\infty(2)$	$\Delta K_\infty/K_\infty$ (pcm)
0	1.09951	1.10033	- 75	1.20645	1.20704	- 49	1.00323	1.00390	- 67
150	1.09564	1.09642	- 71	1.20222	1.20266	- 37	1.00226	1.00239	- 13
1000	1.08912	1.09029	- 107	1.19079	1.19162	- 70	1.00609	1.00648	- 39
3000	1.07195	1.07253	- 54				1.01364	1.01290	+ 73
4000				1.15946	1.15987	- 35			
6000	1.03952	1.03965	- 13				1.01597	1.01600	- 3
8000				1.11451	1.11457	- 5			
9000	1.00835	1.00852	- 17				1.01291	1.01371	- 79
12000	0.98005	0.98127	- 124	1.07362	1.07377	- 14	1.00367	1.00370	- 3
15000	0.95425	0.95420	+ 5				0.98848	0.98837	+ 11
16000				1.03680	1.03699	- 18			
18000	0.93056	0.93031	+ 27				0.96951	0.96928	+ 24
20000				1.00323	1.00323	0			

(1) calcul DIANE avec les sections lissées par VELPO

(2) calcul DIANE avec bibliothèque ponctuelle évolutive (voir IV.5.1.1.)

$$\frac{\Delta K_\infty}{K_\infty} = \left(\text{Log } \frac{k_\infty(1)}{k_\infty(2)}\right) \times 10^{+5}$$

Les données pour PARASITE sont divisées en deux jeux de bibliothèques :

- l'un correspondant à l'effet DOPPLER, qui contient une série de 4 températures effectives du combustible : 200, 286, 850 et 1500°C et à température modérateur nominale T_m^* = 306°C
- l'autre correspondant à l'effet modérateur qui contient une série de 4 températures d'eau 200, 286, 320 et 340°C et à température combustible nominale T_c = 650°C.

On fournit au programme une bibliothèque APOLLO de référence dans les conditions nominales autre que celle obtenue dans le calcul d'évolution.

L'argument NH_2O pour l'ajustement des sections en fonction de la température de l'eau de chaque composition est fourni dans la bibliothèque. En revanche l'argument P/P^* pour l'ajustement des sections en fonction de la température combustible est fourni à partir de la figure (4.1), sachant qu'à la température

- T_c = 286°C la puissance est nulle soit P/P^* = 0
- T_c^* = 650°C la puissance est nominale soit P/P^* = 1

rapport qui peut d'ailleurs être calculé pour chaque température combustible à partir de la formule

$$\frac{P}{P^*} = \frac{T_c - T_m}{T_c^* - T_m}$$

où T_m = 286°C dans notre cas.

L'autoprotection des résonances de l'^{235}U, l'^{238}U et du ^{239}Pu a été prise en compte dans les calculs APOLLO aux diverses températures.

L'erreur de réactivité élémentaire, borne supérieure de l'incertitude sur la contribution de chaque section efficace au bilan de réactivité est limitée à ε = 10 pcm pour tous les assemblages ; ce critère est assez sévère pour prendre en compte la quasi-totalité des effets de puissance.

IV.3.2. Résultats PARASITE

L'ajustement PARASITE concerne toutes les compositions (cellules combustibles, trou d'eau et poison consommable) pour l'effet modérateur alors que l'effet Doppler ne concerne que les compositions "fissiles".

Certains résultats du paramétrage PARASITE sont représentés dans les tableaux 4.2 à 4.4 pour l'assemblage enrichi à 3.1 % sans poison. Comme on n'a pas eu la possibilité de chercher les sections sensibles aux effets de température dans les compositions non fissiles, on présente les résultats PARASITE en plus des cellules périphériques ceux des cellules trou d'eau et poison (tableaux 4.2 et 4.5). Ces tableaux montrent l'évolution de l'erreur du paramétrage sur chaque section aux différentes températures du modérateur et du combustible. Ils regroupent :

- l'erreur tolérée sur la section pour la marge d'incertitude de 10 pcm sur la réactivité,
- le degré d'ajustement de chaque correction : sans ajustement (C_t), linéaire (L), parabolique (P) et cubique (C),
- l'erreur sur les corrections due à l'ajustement par PARASITE à chaque température

L'ordre de grandeur de l'erreur $\Delta\rho_K^i$ induite sur la réactivité d'une composition k par l'écart $\Delta\pi_k^i$ obtenu par le paramétrage et pour l'isotope i est :

$$\Delta\rho_{rg}^{ik} = \frac{\varepsilon}{\text{Erreur tolérée sur } \sigma_{rg}^i} \times \Delta\pi_{rg}^{ik} \quad \begin{matrix}(g : \text{indice de groupe}) \\ (r : \text{type de réaction})\end{matrix}$$

vérifiant toujours $\Delta\rho_{kg}^i \leq \varepsilon$ (sauf pour σ_{a3} ^{238}U, dans le cas particulier des assemblages étudiés ici).

Nous avons porté dans un même tableau 4.6 pour les assemblages enrichis à 2.1, 3.1 % avec et sans poison, le type d'ajustement et l'erreur tolérée sur chaque section. On montre ainsi que, quel que soit l'enrichissement (utilisé dans notre cas) et le fait que l'assemblage contient ou ne contient pas du pyrex, les corrections liées aux effets de température conservent pratiquement le même degré polynômial, ceci confirme que le paramétrage dépend de l'isotope et de la nature de la réaction et peu de sa concentration et de son environnement.

Ainsi par exemple pour ce dernier point, quel que soit la composition (cellules combustible, trou d'eau, poison...) l'absorption de l'eau, du bore soluble, du corps 10 et les sections de transfert ont des ajustements identiques.

TABLEAU 4.2 :

Cellule trou d'eau de l'assemblage 3.1 % sans poison. Effet modérateur (paramétrage PARASITE)

CORPS	Type de σ	Erreur tolérée sur σ (pcm)	Type de paramétrage	(1) T_m=200°C	(1) T_m=286°C	(1) T_m=320°C	(1) T_m=340°C
Eau	σa 1	6384	Ct	- 1119	- 317	+ 279	+ 880
	σa 2	14 10^{+20}	Ct	+ 17	+ 3	- 3	- 10
	σa 3	2295	L	+ 251	- 26	+ 76	+ 403
	σa 4	307	P	- 18	+ 130	- 53	+ 40
Bore soluble	σa 1	72 10^{+4}	Ct	- 171	- 49	+ 42	+ 134
	σa 2	10 10^{+4}	Ct	- 91	- 16	+ 7	+ 7
	σa 3	1947	L	+ 244	- 26	+ 76	+ 390
	σa 4	265	P	- 18	+ 129	- 51	+ 39
Corps 10	Σtr 1	279	L	+ 71	- 13	+ 26	+ 126
	Σtr 2	378	L	+ 31	- 5	+ 11	+ 56
	Σtr 3	744	L	+ 17	- 3	+ 5	+ 31
	Σtr 4	2930	L	- 501	+ 153	- 236	- 1000
	Σa 1	4052	Ct	- 992	- 279	+ 231	+ 720
	Σa 2	5860	Ct	+ 45	+ 1	+ 1	+ 9
	Σa 3	2844	P	+ 209	- 1088	+ 455	- 415
	Σa 4	546	P	- 1	- 1	- 19	+ 4
	$\Sigma_{R1\to2}$	550	L	+ 21	- 4	+ 6	+ 44
	$\Sigma_{R2\to3}$	204	L	- 41	+ 7	- 20	- 87
	$\Sigma_{R3\to4}$	46	P	+ 2	- 8	+ 2	- 4

(1) $\left(\frac{\pi\left[NH_2O(T_m)\right]}{R(T_m)} - 1\right) \times 10^{+5}$ avec $R(T_m) = \frac{\sigma(T_m, 650)}{\sigma(306,650)}$

C'est donc l'écart, à chaque température Tm, entre la correction réelle et la correction calculée par PARASITE après ajustement. C'est la même signification des renvois des tableaux 4.2 à 4.5.

TABLEAU 4.3 :

Cellule combustible périphérique de l'assemblage 3.1 % sans poison. Effet modérateur (paramétrage PARASITE)

CORPS	Type de σ	Erreur tolérée sur σ (pcm)	Type de paramétrage	(1) T_m=200°C	(1) T_m=286°C	(1) T_m=320°C	(1) T_m=340°C
^{235}U	σa 1	4820	Ct	- 760	- 195	+ 158	+ 475
	σa 2	2000	Ct	- 113	- 23	+ 18	+ 36
	σa 3	169	P	- 1	+ 8	- 5	+ 3
	σa 4	40	C	0	+ 9	+ 18	- 3
	σf 1	1827	Ct	- 775	- 201	+ 163	+ 490
	σf 2	1027	Ct	- 159	- 40	+ 23	+ 68
	σf 3	107	P	+ 1	+ 8	- 6	+ 3
	σf 4	19	C	0	+ 10	+ 17	- 3
^{238}U	σa 1	276	L	+ 26	- 2	+ 8	+ 41
	σa 2	360	Ct	- 271	- 67	+ 51	+ 138
	σa 3	55	P	- 2	+ 15	- 6	+ 4
	σa 4	186	P	- 14	+ 93	- 36	+ 29
	σf 1	111	L	+ 33	- 2	+ 11	+ 51
	σf 2	$5.6\ 10^{+4}$	Ct	- 1403	- 391	+ 339	+ 1082
^{236}U	σa 1	$2.3\ 10^{+5}$	Ct	- 1734	- 481	+ 405	+ 1280
	σa 2	$9\ 10^{+4}$	Ct	- 198	- 48	+ 35	+ 102
	σa 3	2218	L	+ 212	- 18	+ 66	+ 342
	σa 4	$4\ 10^{+4}$	Ct	- 6668	- 1392	+ 1020	+ 2838
^{239}Pu	σa 1	$1.7\ 10^{+4}$	Ct	- 765	- 196	+ 161	+ 484
	σa 2	$1.1\ 10^{+4}$	Ct	- 283	- 70	+ 55	+ 170
	σa 3	739	L	+ 97	- 11	+ 29	+ 151
	σa 4	56	P	0	0	- 3	+ 1
	σf 1	5186	Ct	- 774	- 204	+ 157	+ 484
	σf 2	4597	Ct	- 351	- 91	+ 73	+ 225
	σf 3	420	L	+ 111	- 11	+ 33	+ 174
	σf 4	30	P	- 2	+ 10	- 10	+ 4
^{240}Pu	σa 1	$10.3\ 10^{+4}$	Ct	- 759	- 194	+ 158	+ 476
	σa 2	$1.5\ 10^{+5}$	Ct	- 494	- 131	+ 109	+ 339
	σa 3	317	P	- 4	+ 24	- 13	+ 8
	σa 4	1832	L	- 538	+ 146	- 200	- 805
^{241}Pu	σa 1	$2.16\ 10^{+5}$	Ct	- 764	- 201	+ 156	+ 474
	σa 2	10^{+5}	Ct	- 125	- 27	+ 20	+ 47
	σa 3	5570	Ct	- 1573	- 451	+ 391	+ 1266
	σa 4	741	L	+ 94	+ 14	+ 17	+ 159

TABLEAU 4.3 (suite)

CORPS	Type de σ	Erreur tolérée sur σ (pcm)	Type de paramétrage	(1) T_m=200°C	(1) T_m=286°C	(1) T_m=320°C	(1) T_m=340°C
^{241}Pu	σf 1	$7\ 10^{+4}$	Ct	- 763	- 202	+ 156	+ 476
suite	σf 2	$4\ 10^{+4}$	Ct	- 158	- 35	+ 26	+ 75
	σf 3	2448	Ct	- 1484	- 423	+ 369	+ 1190
	σf 4	355	L	+ 13	+ 33	- 12	+ 40
^{242}Pu	σa 1	$2\ 10^{+6}$	Ct	- 827	- 216	+ 173	+ 528
	σa 2	$5\ 10^{+6}$	Ct	- 576	- 155	+ 129	+ 405
	σa 3	$4\ 10^{+4}$	Ct	- 1897	- 555	+ 486	+ 1589
	σa 4	$6\ 10^{+5}$	Ct	- 5773	- 1177	+ 854	+ 2347
	σf 1	$2\ 10^{+6}$	Ct	- 833	- 214	+ 177	+ 540
	σf 2	$1.03\ 10^{+7}$	Ct	- 1226	- 342	+ 292	+ 930
^{135}Xe	σa 1	$3.8\ 10^{+11}$	Ct	- 344	- 79	+ 57	+ 152
	σa 2	$1.5\ 10^{+10}$	Ct	+ 76	+ 32	- 32	- 114
	σa 3	$8.7\ 10^{+5}$	Ct	- 3334	- 132	+ 928	+ 3107
	σa 4	462	P	- 13	+ 93	- 26	+ 27
^{149}Sm	σa 1	$9.6\ 10^{+8}$	Ct	- 276	- 60	+ 41	+ 102
	σa 2	$2.8\ 10^{+7}$	Ct	+ 83	+ 37	- 37	- 120
	σa 3	$13\ 10^{+4}$	Ct	- 3054	- 929	+ 823	+ 2737
	σa 4	2005	L	- 46	+ 5	- 10	- 79
Eau	σa 1	6488	Ct	- 579	- 178	+ 165	+ 552
	σa 2	10^{+21}	Ct	-	-	-	-
	σa 3	2330	L	+ 248	- 27	+ 77	+ 395
	σa 4	311	P	- 18	+ 124	- 45	38
Bore	σa 1	$7\ 10^{+5}$	Ct	+ 282	+ 68	- 51	- 144
soluble	σa 2	$1\ 10^{+5}$	Ct	+ 292	+ 87	- 77	- 249
	σa 3	1978	L	+ 243	- 27	+ 77	+ 386
	σa 4	269	P	- 18	+ 123	- 49	+ 38
Produits	σa 1	$4\ 10^{+5}$	Ct	- 412	- 99	+ 72	+ 201
de	σa 2	$2.7\ 10^{+4}$	Ct	+ 51	+ 23	- 26	- 94
fission	σa 3	479	L	+ 162	- 16	+ 48	+ 258
	σa 4	589	P	- 19	+ 135	- 51	+ 41
Corps 10	Σtr 1	281	L	+ 72	- 11	+ 28	+ 128
	Σtr 2	381	L	+ 35	- 3	+ 13	+ 63
	Σtr 3	750	L	+ 19	0	+ 8	+ 37
	Σtr 4	2957	L	- 386	+ 119	- 176	- 766
	Σa 1	4053	Ct	- 1365	- 380	+ 318	+ 1008
	Σa 2	5860	Ct	+ 381	+ 88	- 69	- 207
	Σa 3	2950	P	+ 199	- 1059	+ 448	- 422
	Σa 4	550	P	+ 7	- 45	- 2	- 8
	$\Sigma R_{1\to2}$	536	L	+ 37	- 2	+ 15	+ 72

TABLEAU 4.3 (suite et fin)

CORPS	Type de	Erreur tolérée sur (pcm)	Type de paramétrage	(1) T_m=200°C	(1) T_m=286°C	(1) T_m=320°C	(1) T_m=340°C
Corps 10 (suite)	$\Sigma R_{2\to3}$	204	L	- 9	+ 8	- 3	- 17
	$\Sigma R_{3\to4}$	45	P	0	0	+ 6	- 2

(1) $\left(\frac{\pi\,[NH_2O(T_m)]}{R(T_m)} - 1\right) \times 10^{+5}$ avec $R(T_m) = \frac{\sigma\,(T_m,\ 650)}{\sigma\,(306,650)}$

TABLEAU 4.4 :

Cellule combustible périphérique de l'assemblage 3.1 % sans poison. Effet Doppler (paramétrage PARASITE)

CORPS	Type de σ	Erreur tolérée sur σ (pcm)	Type de paramétrage	(1) T_c=200°C	(1) T_c=286°C	(1) T_c=850°C	(1) T_c=1500°C
^{235}U	σa 1	4820	Ct	- 30	- 22	+ 8	+ 45
	σa 2	2000	Ct	+ 23	+ 18	- 9	- 36
	σa 3	169	L	- 55	- 63	- 7	- 56
	σa 4	40	L	+ 10	+ 5	+ 2	+ 7
	σf 1	1826	Ct	- 23	- 23	+ 8	+ 39
	σf 2	1027	Ct	+ 11	+ 11	- 11	- 34
	σf 3	106	L	- 64	- 63	- 5	- 60
	σf 4	19	L	+ 8	+ 7	+ 3	+ 6
^{238}U	σa 1	276	Ct	+ 4	+ 4	- 2	- 6
	σa 2	360	P	+ 55	- 39	+ 111	- 14
	σa 3	55	C	- 102	+ 152	+ 62	- 3
	σa 4	186	Ct	- 22	- 15	+ 8	+ 45
	σf 1	111	Ct	+ 17	+ 14	- 5	- 24
	σf 2	$5.6\ 10^{+4}$	Ct	- 97	- 80	+ 36	+ 143
^{236}U	σa 1	$2.3\ 10^{+5}$	Ct	+ 62	+ 51	- 22	- 91
	σa 2	$9\ 10^{+4}$	Ct	+ 17	+ 15	- 8	- 33
	σa 3	2218	Ct	- 459	- 409	+ 191	+ 825
	σa 4	$4\ 10^{+4}$	Ct	- 17	- 17	+ 10	+ 51
^{239}U	σa 1	$1.7\ 10^{+4}$	Ct	- 31	- 26	+ 10	+ 41
	σa 2	$1.1\ 10^{+4}$	Ct	0	0	- 5	- 10
	σa 3	738	Ct	- 294	- 242	+ 111	+ 441
	σa 4	55	L	- 1	- 2	+ 3	- 2
	σf 1	5185	Ct	- 31	- 26	+ 10	+ 37
	σf 2	4597	Ct	- 6	- 6	0	+ 6
	σf 3	420	L	- 51	- 46	- 2	- 47
	σf 4	30	L	- 2	- 1	0	- 1
^{240}Pu	σa 1	$10.3\ 10^{+4}$	Ct	- 30	- 24	+ 12	+ 43
	σa 2	$1.5\ 10^{+5}$	Ct	- 11	- 9	+ 3	+ 11
	σa 3	317	P	+ 98	- 94	+ 109	- 15
	σa 4	1832	Ct	+ 23	+ 17	- 6	- 29
^{241}Pu	σa 1	$2.16\ 10^{+5}$	Ct	- 29	- 23	+ 12	+ 40
	σa 2	10^{+5}	Ct	+ 20	+ 16	- 8	- 31
	σa 3	5570	Ct	- 518	- 463	+ 210	+ 911
	σa 4	741	Ct	+ 19	+ 15	- 7	- 34

TABLEAU 4.4 (suite)

CORPS	Type de σ	Erreur tolérée sur σ (pcm)	Type de paramétrage	(1) T_c=200°C	(1) T_c=286°C	(1) T_c=850°C	(1) T_c=1500°C
^{241}Pu suite	σf 1	$7\ 10^{+4}$	Ct	- 29	- 23	+ 6	+ 40
	σf 2	$4\ 10^{+4}$	Ct	+ 18	+ 13	- 4	- 26
	σf 3	2447	Ct	- 543	- 486	+ 220	+ 955
	σf 4	355	Ct	+ 15	+ 12	- 4	- 23
^{242}Pu	σa 1	$1.97\ 10^{+6}$	Ct	- 18	- 18	+ 6	+ 31
	σa 2	$4.74\ 10^{+6}$	Ct	- 17	- 13	+ 4	+ 19
	σa 3	$4\ 10^{+4}$	Ct	- 292	- 264	+ 129	+ 610
	σa 4	$6\ 10^{+5}$	Ct	- 15	- 14	+ 9	+ 43
	σf 1	$2\ 10^{+6}$	Ct	- 19	- 13	+ 6	+ 32
	σf 2	$1.03\ 10^{+7}$	Ct	- 85	- 70	+ 28	+ 118
^{135}Xe	σa 1	$4\ 10^{+11}$	Ct	- 85	- 70	+ 30	+ 124
	σa 2	$1.5\ 10^{+10}$	Ct	+ 51	+ 45	- 19	- 89
	σa 3	$8.7\ 10^{+5}$	Ct	- 798	- 656	+ 287	+ 1097
	σa 4	461	Ct	- 36	- 29	+ 21	+ 100
^{149}Sm	σa 1	$9.5\ 10^{+8}$	Ct	- 93	- 76	+ 35	+ 136
	σa 2	$2.8\ 10^{+7}$	Ct	+ 46	+ 46	- 18	- 92
	σa 3	$13\ 10^{+4}$	Ct	- 835	- 680	+ 292	+ 1140
	σa 4	2005	Ct	- 24	- 22	+ 17	+ 69
Eau	σa 1	6442	Ct	+ 181	+ 148	- 65	- 266
	σa 2	10^{+21}	Ct	+ 3	+ 3	- 3	- 7
	σa 3	2315	Ct	- 428	- 365	+ 160	+ 662
	σa 4	309	Ct	- 11	- 8	+ 8	+ 30
Bore soluble	σa 1	$7\ 10^{+5}$	Ct	+ 39	+ 32	- 14	- 56
	σa 2	10^{+5}	Ct	+ 56	+ 49	- 22	- 87
	σa 3	1977	Ct	- 411	- 351	+ 156	+ 637
	σa 4	268	Ct	- 12	- 12	+ 5	+ 28
Produits de fission	σa 1	$4\ 10^{+5}$	Ct	- 78	- 64	+ 27	+ 110
	σa 2	$2.7\ 10^{+4}$	Ct	+ 44	+ 39	- 19	- 79
	σa 3	479	L	- 27	- 48	- 5	- 34
	σa 4	588	Ct	- 31	- 25	+ 15	+ 72
Corps 10	Σtr 1	281	L	- 50	- 42	- 5	- 44
	Σtr 2	581	Ct	- 15	- 15	+ 9	+ 37
	Σtr 3	750	Ct	+ 505	+ 405	- 173	- 688
	Σtr 4	2956	Ct	+ 18	+ 14	- 5	- 17
	Σa 1	4052	Ct	+ 121	+ 99	- 44	- 179
	Σa 2	5860	Ct	+ 41	+ 35	- 16	- 69

TABLEAU 4.4 (*suite et fin*)

CORPS	Type de section σ	Erreur tolérée sur σ (pcm)	Type de paramétrage	(1) T_c=200°C	(1) T_c=286°C	(1) T_c=850°C	(1) T_c=1500°C
Corps 10 suite	Σa 3	2950	P	- 221	+ 103	- 593	+ 64
	Σa 4	550	P	- 51	+ 31	- 118	+ 14
	$\Sigma_{R1\to2}$	534	Ct	- 57	- 47	+ 20	+ 83
	$\Sigma_{R2\to3}$	204	Ct	+ 82	+ 70	- 33	- 134
	$\Sigma_{R3\to4}$	45	P	+ 8	- 16	- 17	+ 2

(1) $\left(\frac{\pi \left[P/P^{*}(T_c) \right]}{R(T_c)} - 1 \right) \times 10^{+5}$ avec $R(T_c) = \frac{\sigma(306,T_c)}{\sigma(306,650)}$

TABLEAU 4.5 :

Cellule poison de l'assemblage 3.1 % 16 BP. Effet modérateur (Paramétrage PARASITE)

CORPS	Type de σ	Erreur tolérée sur σ (pcm)	Type de paramétrage	(1) T_m=200°C	(1) T_c=286°C	(1) T_m=320	(1) T_m=340°C
Bore 10 du pyrex	σa 1	1 451 400	Ct	- 91	- 25	+ 19	+ 55
	σa 2	158 130	Ct	+ 18	+ 14	- 23	- 78
	σa 3	3 099	Ct	- 2500	- 736	+ 650	+ 2126
	σa 4	535	P	- 14	+ 99	- 39	+ 30
Bore 11 du pyrex	σa 1	$1.11\ 10^{+9}$	Ct	- 1511	- 444	+ 395	+ 1281
	σa 2	$2.79\ 10^{+8}$	Ct	+ 58	+ 30	- 35	- 131
	σa 3	$7.66\ 10^{+7}$	Ct	- 2492	- 736	+ 651	+ 2121
	σa 4	$1.32\ 10^{+7}$	Ct	- 7083	- 1487	+ 1092	+ 3052
Eau	σa 1	6412	Ct	- 1196	- 346	+ 298	+ 956
	σa 2	$1.42\ 10^{+21}$	Ct	+ 23	+ 7	- 7	- 17
	σa 3	2282	L	+ 262	- 29	+ 79	+ 420
	σa 4	344	P	- 17	+ 117	- 48	+ 37
Bore soluble	σa 1	720 190	Ct	- 156	- 46	+ 42	+ 134
	σa 2	101 240	Ct	+ 40	+ 21	- 26	- 95
	σa 3	1 935	L	+ 256	- 31	+ 78	+ 409
	σa 4	297	P	- 17	+ 117	- 49	+ 37
Corps 10	Σtr 1	494	L	+ 61	- 13	+ 22	+ 106
	Σtr 2	460	L	+ 28	- 7	+ 8	+ 48
	Σtr 3	1 295	L	+ 16	- 6	+ 4	+ 28
	Σtr 4	5 606	L	- 367	+ 102	- 170	- 725
	Σa 1	3 620	Ct	- 1029	- 292	+ 249	+ 798
	Σa 2	5 294	Ct	+ 143	+ 33	- 28	- 87
	Σa 3	8 100	Ct	- 8673	- 481	- 97	- 1469
	Σa 4	470	P	- 13	+ 86	- 38	+ 27
	$\Sigma_{R1\to2}$	284	L	+ 11	- 7	+ 1	+ 21
	$\Sigma_{R2\to3}$	263	L	- 36	+ 2	- 19	- 76
	$\Sigma_{R3\to4}$	45	P	+ 1	- 14	+ 2	- 3

(1) $\left(\frac{\pi[NH_2O\ (Tm)]}{R\ (Tm)} - 1\right) \times 10^{+5}$ avec $R\ (Tm) = \frac{\sigma(Tm,\ 650)}{\sigma(306,\ 650)}$

TABLEAU 4.6 :

Nature d'ajustement retenue par PARASITE sur les cellules périphériques de différents assemblages

CORPS	Type de section	Erreur tolérée sur la section (pcm)			Type d'ajustement					
					Effet modérateur			Effet Doppler		
		3.1 % SP	3.1 % 16 BP	2.1 % SP	3.1% SP	3.1 % 16 BP	2.1% SP	3.1% SP	3.1 % 16 BP	2.1% SP
^{235}U	σa 1	4820	4593	8022						
	σa 2	2000	1863	3303						
	σa 3	169	158	265	P	P	L	L	L	L
	σa 4	40	42	50	C	C	C	L	L	L
	σf 1	1826	1741	3039						
	σf 2	1027	957	1698						
	σf 3	106	100	168	P	P	L	L	L	L
	σf 4	19	20	24	C	C	C	L	L	L
^{238}U	σa 1	276	260	256	L	L	L			
	σa 2	360	339	333				P	P	P
	σa 3	55	52	50	P	P	P	C	C	C
	σa 4	186	197	132	P	P	P			
	σf 1	111	107	103	L	L	L			
	σf 2	$5.6\ 10^{+4}$	$5.3\ 10^{+4}$	$5.2\ 10^{+4}$						
^{236}U	σa 1	$23\ 10^{+4}$	$22\ 10^{+4}$	$25\ 10^{+4}$						
	σa 2	$9\ 10^{+4}$	$8\ 10^{+4}$	$10\ 10^{+4}$						
	σa 3	2218	2083	2379	L	L	L			
	σa 4	$3.9\ 10^{+4}$	$4.1\ 10^{+4}$	$3.3\ 10^{+4}$						
^{239}Pu	σa 1	$1.7\ 10^{+4}$	$1.5\ 10^{+4}$	$1.6\ 10^{+4}$						
	σa 2	$1.1\ 10^{+4}$	9584	$1.0\ 10^{+4}$						
	σa 3	738	646	660	L	L	L			
	σa 4	56	54	42	P	P	P	L	L	L
	σf 1	5185	4623	4861						
	σf 2	4597	4016	4290						
	σf 3	420	368	376	L	L	L	L	L	L
	σf 4	30	29	23	P	P	P	L	L	L
^{240}Pu	σa 1	$10\ 10^{+4}$	$9\ 10^{+4}$	$7\ 10^{+4}$						
	σa 2	$16\ 10^{+4}$	$14\ 10^{+4}$	$11\ 10^{+4}$						
	σa 3	317	295	236	P	P	P	P	P	P
	σa 4	1832	1849	1026	L	L	L			
^{241}Pu	σa 1	$22\ 10^{+4}$	$19\ 10^{+4}$	$15\ 10^{+4}$						
	σa 2	$10\ 10^{+4}$	$9\ 10^{+4}$	$7\ 10^{+4}$						
	σa 3	5570	4754	3730						

TABLEAU 4.6 (suite)

CORPS	Type de section	Erreur tolérée sur la section (pcm)			Type d'ajustement					
					Effet modérateur			Effet Doppler		
		3.1 % SP	3.1 % 16 BP	2,1 % SP	3.1% SP	3.1 % 16 BP	2.1% SP	3.1% SP	3.1 % 16 BP	2.1 % SP
^{241}Pu suite	σa 4	741	710	435	L	L	L			
	σf 1	$7\ 10^{+4}$	$6\ 10^{+4}$	$5\ 10^{+4}$						
	σf 2	$4\ 10^{+4}$	$3\ 10^{+4}$	$2.7\ 10^{+4}$						
	σf 3	2447	2088	1640						
	σf 4	355	340	194	L	L	L			
^{242}Pu	σa 1	$197\ 10^{+4}$	$175\ 10^{+4}$	$96\ 10^{+4}$						
	σa 2	$474\ 10^{+4}$	$413\ 10^{+4}$	$230\ 10^{+4}$						
	σa 3	$3\ 10^{+4}$	$3\ 10^{+4}$	$2\ 10^{+4}$						
	σa 4	$62\ 10^{+4}$	$61\ 10^{+4}$	$23\ 10^{+4}$						
	σf 1	$202\ 10^{+4}$	$179\ 10^{+4}$	$98\ 10^{+4}$						
	σf 2	$1035\ 10^{+4}$	$906\ 10^{+4}$	$507\ 10^{+4}$						
^{135}Xe	σa 1	$39\ 10^{+10}$	$36\ 10^{+10}$	$50\ 10^{+10}$						
	σa 2	$1.5\ 10^{+10}$	$1.4\ 10^{+10}$	$2\ 10^{+10}$						
	σa 3	$87\ 10^{+4}$	$79\ 10^{+4}$	$103\ 10^{+4}$						
	σa 4	461	470	432	P	P	P			
^{149}Sm	σa 1	$9.6\ 10^{+8}$	$8.6\ 10^{+8}$	$12.7\ 10^{+8}$						
	σa 2	$28\ 10^{+6}$	$25\ 10^{+6}$	$37\ 10^{+6}$						
	σa 3	$13\ 10^{+4}$	$12\ 10^{+4}$	$16\ 10^{+4}$						
	σa 4	2005	2006	2000	L	L	L			
Eau	σa 1	6384	6412	5835						
	σa 2	$14\ 10^{+20}$	$14\ 10^{+20}$	$15\ 10^{+20}$						
	σa 3	2295	2282	2057	L	L	L			
	σa 4	307	344	228	P	P	P			
Bore soluble	σa 1	$72\ 10^{+4}$	$72\ 10^{+4}$	$67\ 10^{+4}$						
	σa 2	$10\ 10^{+4}$	$10\ 10^{+4}$	$9.6\ 10^{+4}$						
	σa 3	1947	1935	1746	L	L	L			
	σa 4	265	297	196	P	P	P			
Produits de fission	σa 1	$40\ 10^{+4}$	$39\ 10^{+4}$	$38\ 10^{+4}$						
	σa 2	$2.7\ 10^{+4}$	$2.5\ 10^{+4}$	$2.5\ 10^{+4}$						
	σa 3	479	452	424	L	L	L	L	L	L
	σa 4	588	606	443	P	P	P			
Corps 10	Σtr 1	279	494	1166	L	L	L	L		
	Σtr 2	378	660	1610	L	L	L			
	Σtr 3	744	1295	3070	L	L	L			
	Σtr 4	2930	5606	$1.0\ 10^{+4}$	L	L	L			

TABLEAU 4.6 (suite et fin)

CORPS	Type de Section	Erreur tolérée sur la section (pcm)			Type d'ajustement					
					Effet modérateur			Effet Doppler		
		3.1 % SP	3.1 % 16 BP	2.1 % SP	3.1% SP	3.1 % 16 BP	2.1% SP	3.1% SP	3.1 % 16 BP	2.1 % SP
Corps 10 suite	Σa 1	4052	3619	3724						
	Σa 2	5860	5294	5455						
	Σa 3	2844	8100	2409	P	P	P	P	L	P
	Σa 4	546	469	442	P	P	P	P	P	P
	$\Sigma_{R1\to2}$	550	284	156	L	L	L			
	$\Sigma_{R2\to3}$	204	263	513	L	L	L			
	$\Sigma_{R3\to4}$	46	45	45	P	P	P	P	P	P

IV.4. CALCULS DE CONTRE-REACTIONS DIANE

Toutes les bibliothèques des assemblages sont mises en format pour les calculs d'évolution et contre-réactions. Ces calculs se feront sur la symétrie quart assemblage dans les conditions suivantes :

- en milieu infini avec un laplacien axial nul (sauf cas contraire)
- au taux de combustion τ = 12 000 MWJ/t auquel nous disposons les calculs de référence APOLLO en contre-réaction. Les concentrations des différents corps à 12 000 MWJ/t sont issues d'APOLLO, le Xénon étant à l'équilibre
- l'activation modérateur concerne toutes les réactions ainsi que tous les groupes, alors que l'activation Doppler ne concerne que les trois derniers groupes pour l'absorption, les deux derniers pour la fission et seulement une section de transfert épithermique

IV.4.1. Essai d'activation dans les conditions nominales

Un essai préliminaire d'activation [1] des effets modérateur et Doppler est effectué sur l'assemblage enrichi à 3.1% 16 BP avec laplacien critique non nul et à τ = 0 MWJ/t. Ce calcul fournit la valeur propre k_{eff} = 0.99817, alors que la valeur propre correspondante au calcul de diffusion DIANE sans activation vaut k_{eff} = 0.99724 soit un écart relatif de 93 pcm, sachant à priori que dans les conditions nominales de température l'incertitude due à l'ajustement PARASITE est faible ($\pi(NH_2O) \simeq 1$ et $\pi(P/P*) \simeq 1$). En vertu de la relation liant l'accroissement de l'enthalpie à la puissance (voir II.8.2) $H = H_o + AP$, la température de l'eau dans les trous d'eau et les cellules avec poison reste figée à la température d'entrée T_m = 286°C car la puissance dans ces types de cellules est nulle.

Nous pallions cet inconvénient en multipliant le coefficient d'homogénéisation c_k (liant la densité d'eau à sa concentration en noyaux par cm^3) par le rapport $\rho(T_m)/\rho_o$ où $\rho(T_m)$ et ρ_o sont les densités théoriques de l'eau à T_m et 286°C. Dans ce cas particulier T_m = 306°C. La correction étant faite, l'écart qui subsiste n'est que de 1 pcm (k_{eff} = 0.99816).

IV.4.2. Résultats d'activation sur les assemblages

Hormis l'assemblage enrichi à 2.6 % avec 20 barreaux de pyrex (voir annexe), nous présentons dans les tableaux 4.7 à 4.12 les valeurs du k^∞ des calculs DIANE et APOLLO, les coefficients de température respectifs calculés par rapport aux conditions nominales, les écarts relatifs sur k^∞ (en pcm) et les écarts absolus sur le coefficient de température (en pcm/°C) entre les calculs DIANE et APOLLO.

Ces calculs ont été faits dans les conditions déjà citées. La valeur du k^∞ DIANE dans les conditions nominales est celle qui provient d'une évolution et non d'une activation et à

---

(1) pour la définition du terme activation il faut se reporter au paragraphe II.8.1.

l'inverse pour la valeur du k^{∞} APOLLO. Cette précaution nous permet d'être homogène avec les réactivités aux autres températures.

D'une manière générale, le sens de variation des coefficients de température APOLLO soit en fonction de l'enrichissement soit en fonction du nombre de poisons consommables (quand l'un d'eux est fixé) est bien respecté par le calcul DIANE.

Nous pouvons remarquer que DIANE surestime ces coefficients de température à toutes les températures du modérateur et du combustible. Seulement ils sont sous-estimés à T_m = 286°C et à T_c = 286°C. Une explication de ce phénomène local sera donnée dans la suite de ce chapitre.

Dans tous les assemblages l'écart sur le coefficient de température du modérateur reste inférieur à 1 pcm/°C entre T_m = 286 et T_m = 306°C ; l'écart sur l'effet Doppler est mieux que 26 pcm sur l'effet intégral des températures T_c = 286 et 650°C.

TABLEAU 4.7 :

Assemblage : 2.1 % SP 12 000 MWJ/t 600 ppm de bore

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	$K\infty_D$ DIANE	$K\infty_A$ APOLLO	$\frac{K\infty_D - K\infty_A}{K\infty_A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	0.98303	0.98321	- 18	- 2.87	- 1.90	- 0.97
286	650	0.98218	0.98353	- 137	- 10.91	- 11.71	+ 0.80
306	650	0.98004	0.98123	- 121			
320	650	0.97724	0.97850	- 129	- 20.44	- 19.90	- 0.54
340	650	0.96877	0.97046	- 174	- 34.02	- 32.46	- 1.56
306	200	0.99361	0.99451	- 91	- 3.05	- 2.98	- 0.07
306	286	0.99076	0.99208	- 133	- 2.98	- 3.01	+ 0.03
306	650	0.98004	0.98123	- 121			
306	850	0.97512	0.97659	- 150	- 2.53	- 2.38	- 0.15
306	1500	0.96115	0.96268	- 159	- 2.29	- 2.25	- 0.04

TABLEAU 4.8 :

Assemblage : 2.6 % 1'2 BP 12 000 MWJ/t 600 ppm de bore

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	$K\infty_D$ DIANE	$K\infty_A$ APOLLO	$\frac{K\infty_D - K\infty_A}{K\infty_A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.02128	1.02218	- 88	- 9.87	- 9.14	- 0.73
286	650	1.01459	1.01642	- 180	- 19.45	- 20.16	+ 0.71
306	650	1.01065	1.01233	- 166			
320	650	1.00648	1.00822	- 174	- 29.53	- 29.06	- 0.47
340	650	0.99539	0.99766	- 228	- 44.75	- 42.93	- 1.82
306	200	1.02466	1.02620	- 150	- 3.05	- 3.02	- 0.03
306	286	1.02172	1.02365	- 189	- 2.98	- 3.05	+ 0.07
306	650	1.01065	1.01233	- 166			
306	850	1.00556	1.00748	- 190	- 2.54	- 2.41	- 0.13
306	1500	0.99106	0.99300	- 196	- 2.30	- 2.27	- 0.03

TABLEAU 4.9 :

Assemblage : 2.6 % 16 BP 12 000 MWJ/t 600 ppm de bore

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	$K\infty_D$ DIANE	$K\infty_A$ APOLLO	$\frac{K\infty_D - K\infty_A}{K\infty_A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.01517	1.01630	- 111	- 10.75	- 9.93	- 0.82
286	650	1.00790	1.00995	- 203	- 21.03	- 21.28	+ 0.25
306	650	1.00367	1.00566	- 198			
320	650	0.99946	1.00141	- 195	- 30.02	- 30.25	+ 0.23
340	650	0.98811	0.99058	- 250	- 45.95	- 44.44	- 1.51
306	200	1.01778	1.01957	- 175	- 3.10	- 3.05	- 0.05
306	286	1.01483	1.01701	- 215	- 3.03	- 3.07	+ 0.04
306	650	1.00367	1.00566	- 198			
306	850	0.99865	1.00081	- 216	- 2.52	- 2.43	- 0.09
306	1500	0.98413	0.98630	- 220	- 2.31	- 2.29	- 0.02

TABLEAU 4.10 :

Assemblage : 3.1 % SP 12 000 MWJ/t 600 ppm de bore

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	$K\infty_D$ DIANE	$K\infty_A$ APOLLO	$\frac{K\infty_D - K\infty_A}{K\infty_A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.08638	1.08624	+ 13	- 11.15	- 10.07	- 1.08
286	650	1.07813	1.07918	- 97	- 20.96	- 20.75	- 0.21
306	650	1.07362	1.07471	- 102			
320	650	1.06919	1.07033	- 107	- 29.53	- 29.17	- 0.43
340	650	1.05742	1.05926	- 174	- 44.72	- 42.59	- 2.13
306	200	1.08806	1.08889	- 76	- 2.96	- 2.91	- 0.05
306	286	1.08501	1.08628	- 117	- 2.89	- 2.93	+ 0.04
306	650	1.07362	1.07471	- 102			
306	850	1.06841	1.06977	- 127	- 2.44	- 2.32	- 0.12
306	1500	1.05369	1.05500	- 124	- 2.20	- 2.18	- 0.02

TABLEAU 4.11 :

Assemblage : 3.1 % 12 BP 12 000 MWJ/t 600 ppm de bore

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	$K\infty_D$ DIANE	$K\infty_A$ APOLLO	$\frac{K\infty_D - K\infty_A}{K\infty_A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.06176	1.06244	- 64	- 13.12	- 12.25	- 0.87
286	650	1.05197	1.05369	- 163	- 23.20	- 23.59	+ 0.39
306	650	1.04710	1.04873	- 156			
320	650	1.04229	1.04398	- 162	- 32.89	- 32.43	- 0.46
340	650	1.03000	1.03227	- 220	- 48.43	- 46.53	- 1.90
306	200	1.06141	1.06290	- 140	- 3.01	- 2.98	- 0.03
306	286	1.05840	1.06029	- 178	- 2.94	- 3.00	+ 0.06
306	650	1.04710	1.04873	- 156			
306	850	1.04192	1.04379	- 179	- 2.49	- 2.37	- 0.12
306	1500	1.02715	1.02904	- 184	- 2.26	- 2.23	- 0.03

TABLEAU 4.12 :

Assemblage : 3.1 % 16 BP 12 000 MWJ/t 600 ppm de bore

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	K^{∞}_D DIANE	K^{∞}_A APOLLO	$\frac{K^{\infty}_D - K^{\infty}_A}{K^{\infty}_A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.05324	1.05437	- 107	- 13.80	- 12.96	- 0.84
286	650	1.04293	1.04511	- 209	- 23.98	- 24.56	+ 0.58
306	650	1.03794	1.03999	- 197			
320	650	1.03304	1.03514	- 203	- 33.80	- 33.39	- 0.41
340	650	1.02062	1.02322	- 254	- 49.49	- 47.81	- 1.68
306	200	1.05224	1.05417	- 179	- 3.01	- 3.00	- 0.01
306	286	1.04930	1.05156	- 225	- 2.96	- 3.03	+ 0.07
306	650	1.03803	1.03999	- 197			
306	850	1.03277	1.03506	- 222	- 2.55	- 2.39	- 0.16
306	1500	1.01803	1.02032	- 223	- 2.29	- 2.25	- 0.04

IV.5. EVALUATIONS DES INCERTITUDES DANS LES CALCULS DE CONTRE-REACTIONS DIANE

Nous essayons dans ce paragraphe, de découpler les effets de certains paramètres et d'évaluer les différentes sources d'incertitude sur la réactivité lors de l'activation des effets de contre-réactions :

- l'ajustement des sections efficaces par PARASITE à 12 000 MWJ/t
- l'hypothèse de conservation des effets de contre-réactions sur les sections microscopiques quel que soit le taux de combustion (nous analyserons ce problème en détail à toutes les températures à 0 et 24 000 MWJ/t). Le problème que présentent les poisons consommables ne sera traité que dans des conditions particulières
- la séparabilité des effets Doppler et modérateur
- l'influence d'une autre concentration du bore que 600 ppm
- la méthode de calcul de diffusion.

IV.5.1. Origine des écarts DIANE - APOLLO sur un assemblage sans poison

Pour une raison de simplification, les comparaisons sont étudiées sur l'assemblage enrichi à 3.1 % sans poison, pour éliminer l'ajustement EQUIPAGE et pour pouvoir comparer aisément les incertitudes sur la réactivité introduites par les calculs DIANE et PARASITE. Nous évitons ainsi, dans une première étape l'imprécision que peut introduire l'ajustement des poisons consommables par EQUIPAGE. D'autre part, nous disposons pour cet assemblage des bibliothèques d'effets de puissance à 0 et 24 000 MWJ/t, ce qui nous permettera par la suite de valider les corrections apportées par les fonctions $\pi(NH_2O)$ et $\pi(P/P^*)$ à ces taux de combustion.

IV.5.1.1. Définition

Désormais nous désignons par le qualificatif "ponctuelle" une bibliothèque dans l'état où elle est fournie par les sorties APOLLO sans être traitée ni par VELPO, ni par PARASITE. Elle peut provenir :

- d'une évolution APOLLO à un taux d'irradiation quelconque, dans notre cas 0, 12 000, 24 000 MWJ/t (bibliothèque ponctuelle évolutive)
- d'un calcul APOLLO d'effets de puissance (bibliothèque ponctuelle contre-réactive).

En général les bibliothèques ponctuelles serviront pour des calculs de référence DIANE.

IV.5.1.2. Conditions nominales

Toutes les comparaisons sont faites à 12 000 MWJ/t et dans les conditions nominales. L'écart de - 102 pcm constaté sur la réactivité entre les calculs DIANE et APOLLO peut être dans ces conditions décomposé comme suit :

- Valeurs propres fournies par les calculs APOLLO à partir d'une :

A1 - évolution $\lambda = 1.07241$

A2 - contre-réaction $\lambda = 1.07471$ (reprise à 12 000 MWJ/t)

d'où un écart - 214 pcm dû à l'autoprotection des isotopes ^{235}U, ^{238}U et ^{239}Pu dans le calcul A2

- Valeurs propres fournies par les calculs DIANE à partir de :

D3 - bibliothèque évolutive ponctuelle $\lambda = 1.07377$

D4 - bibliothèque ajustée par VELPO $\lambda = 1.07362$

d'où un écart de - 14 pcm dû à l'ajustement VELPO à ce taux d'irradiation.

L'écart de + 127 pcm entre les calculs A1 et D3, s'explique par l'absence de l'ajustement des cellules trous d'eau pour avoir l'équivalence Transport-Diffusion.

La sommation de tous ces écarts donne - 101 pcm.

D5 - bibliothèque avec activation Doppler et modérateur $\lambda = 1.07358$

4 pcm dûs à l'ajustement PARASITE (D5 et D4).

IV.5.1.3. Etats de température autres que les conditions nominales

Pour évaluer les incertitudes dues à PARASITE et éventuellement au calcul DIANE, nous ne comparons que les calculs DIANE. Les calculs DIANE qui emploient des bibliothèques ponctuelles définies ci-dessus serviront de référence.

DIANE calcule les sections à partir de l'expression (1) (voir chapitre III) en activant un effet de température et en laissant fixe l'autre :

$$\sigma(\tau, T_m, T_c) = \sigma(\tau) * \pi(X)$$

où $X = \begin{cases} NH_2O \text{ et } \pi(P/P*) = 1 & \text{activation de l'effet modérateur} \\ \text{ou} \\ P/P* \text{ et } \pi(NH_2O) = 1 & \text{activation de l'effet Doppler} \end{cases}$

Désignons par Δk l'écart de réactivité entre DIANE activé à la température $\theta(\theta = T_m$ ou $T_c)$ et DIANE utilisant une bibliothèque ponctuelle contre-réactive à la température θ. Δk comprend :

- l'écart dû à l'ajustement VELPO (- 14 pcm)
- l'écart dû à l'autoprotection des noyaux résonnants (- 89 pcm)
- $\Delta\rho$ écart dû à l'ajustement PARASITE qu'on se propose de déduire, d'où :

$$\Delta\rho = \Delta k + 103$$

On a résumé dans les lignes suivantes les différents calculs conduisant à l'obtention de Δk dans le cas où $T_m = 200°C$:

. DIANE Activation à $T_m = 200°C$ à 12 000 MWJ/t — $\lambda = 1.08638$
(constantes VELPO + PARASITE)

. DIANE Evolution seule 12 000 MWJ/t
(constantes VELPO) T_m^* , T_c^* — $\lambda = 1.07362$

- 14 pcm

. DIANE Ponctuel avec bibliothèque évolutive
(constantes APOLLO évolution à 12 000 MWJ/t) T_m^*, T_c^* — $\lambda = 1.07377$

- 89 pcm

. DIANE Ponctuel avec bibliothèque contre-réactive
(constantes APOLLO de puissance à 12 000 MWJ/t)
T_m^*, T_c^* — $\lambda = 1.07473$

$\Delta\rho$

. DIANE Ponctuel avec bibliothèque contre-réactive
(constantes APOLLO de puissance à 12 000 MWJ/t)
$T_m = 200°C$, T_c^* — $\lambda = 1.08733$

$= \Delta k = - 87$ pcm

A cette température on déduit + 16 pcm pour $\Delta\rho$ que doit introduire en principe le paramétrage PARASITE à $T_m = 200°C$. En effectuant le calcul PARASITE on trouve 15 pcm.

De la même façon on détermine les incertitudes dues à l'activation aux autres températures du modérateur et du combustible. Le tableau suivant regroupe celles qui ont été calculées par cette procédure et celles qui sont données par PARASITE pour chaque température par :

$$(\Delta\rho)^k_{PARASITE} = \sum_i \sum_r \sum_g \delta_r \Delta\rho^{ik}_{rg}$$

$\delta = - 1$ si r = absorption

$\delta = + 1$ si r = fission, transfert

Nous ne représentons que $(\Delta\rho)^k$ le plus grand qu'on note ($\Delta\rho$ PARASITE) pour l'effet du modérateur (de la cellule latérale à un trou d'eau dont les taux de réaction sont plus importants), (PARASITE) moyen de toutes les cellules combustible pour l'effet Doppler. Cette méthode nous permettra de vérifier la qualité des bibliothèques que l'on a constituées.

T_m °C	T_c °C	K_∞^A DIANE Activation	K_∞^P DIANE Ponctuel	$\frac{K_\infty^A - K_\infty^P}{K_\infty^P}$ (pcm)	Δρ calculée (pcm)	Δρ (1) PARASITE (pcm)
200	650	1.08638	1.08733	- 87	+ 16	+ 15
286	650	1.07813	1.07948	- 125	- 22	- 13
320	650	1.06919	1.07013	- 88	+ 15	+ 10
340	650	1.05742	1.05865	- 116	- 13	- 14
306	200	1.08806	1.08901	- 87	+ 16	+ 29
306	286	1.08501	1.08637	- 125	- 22	- 14
306	850	1.06841	1.06975	- 125	- 22	- 21
306	1500	1.05369	1.05488	- 113	- 10	- 26

TABLEAU 4.13 : Incertitudes du paramétrage PARASITE (Δρ PARASITE) et incertitudes du paramétrage PARASITE augmentées par d'autres effets secondaires (Δρ calculée). Assemblage 3.1 % sans poison 12 000 MWJ/t 600 ppm de bore

a/ Commentaires :

Effet modérateur

A T_m = 286°C, on note une différence de - 9 pcm entre Δρ calculée et Δρ PARASITE. A cette température, il faut incriminer un écart de température de 0.4°C dû à l'expression polynômiale de la densité d'eau ρ_{H_2O} en fonction de l'enthalpie, ce qui conduit à un effet de - 8 pcm sur la réactivité puisque l'on a un coefficient modérateur de - 20.8 pcm/°C à la température T_m = 286°C, avec un titre en bore de 600 ppm. Il en est de même pour T_m = 320°C où l'écart introduit par l'expression de ρ_{H_2O} est de 3 pcm.

Effet Doppler

Les différences entre Δρ calculée et Δρ PARASITE sont relativement importantes pour les températures extrêmes du combustible. Par exemple à T_c = 1500°C, elle peut atteindre - 16 pcm.

L'origine de ces différences est liée à la non prise en compte du spectre Doppler dans la cellule trou d'eau, qui affecte plus particulièrement la section de transfert épithermique comme cela est réalisé dans les cellules combustible. Le tableau suivant permet de rendre compte de l'effet de spectre Doppler sur $\Sigma_{R\ 3\to4}$ des compositions non fissiles (la précision tolérée par $\Sigma_{R3\to4}$ s'élève à 0.046% pour ε = 10 pcm).

---

(1) les erreurs induites par les sections de transport sont déduites de Δρ (calculs DIANE avec Laplacien nul)

T_c °C → T_m = 306°C	200	286	850	1500
$R(T_c) = \frac{\Sigma_{R3\to4}(T_c)}{\Sigma_{R3\to4}(650)}$	1.00531	1.00447	0.99805	0.99209
$\frac{1-R(T_c)}{R(T_c)}$ en %	- 0.528	- 0.445	0.195	0.797

TABLEAU 4.14 : Effet de spectre Doppler (sur $\Sigma_{R3\to4}$) dans la cellule trou d'eau. Assemblage 3.1 % sans poison 12 000 MWJ/t 600 ppm de bore

Le calcul DIANE est repris avec la correction de 0.99209 de $\Sigma_{R3\to4}$ dans la cellule trou d'eau à T_c = 1500°C, la réactivité est corrigée de - 19 pcm. La non prise en compte de l'effet Doppler dans la cellule trou d'eau ne perturbe pratiquement pas la distribution de puissance (0.005 %). L'effet Doppler sur les autres sections est négligeable.

Le tableau 4.15 montre l'écart absolu sur les coefficients de température entre les calculs DIANE et APOLLO ainsi que l'erreur sur ces coefficients introduite par le paramétrage des sections en fonction de NH_2O et P/P* (avec Δρ calculée et Δρ Parasite).

L'écart absolu sur le coefficient modérateur $\Delta C\theta_M$ introduit par le paramétrage PARASITE reste inférieur à 1 pcm/°C quelle que soit la température modérateur ; cependant il est légèrement supérieur à 20 pcm pour l'effet Doppler intégral (en particulier pour T_c = 200°C).

T_m °C	T_c °C	$C\theta_D - C\theta_A$ pcm/°C	ΔC_θ calculée pcm/°C	ΔC_θ PARASITE pcm/°C
200	650	- 1.08	- 0.15	- 0.14
286	650	- 0.21	+ 1.10	+ 0.65
320	650	- 0.36	+ 1.07	+ 0.71
340	650	- 2.13	- 0.38	- 0.41
306	200	- 0.05	- 0.04	- 0.06
306	286	+ 0.04	+ 0.06	+ 0.04
306	850	- 0.12	- 0.11	- 0.11
306	1500	- 0.02	- 0.01	- 0.03

TABLEAU 4.15 : Erreurs sur les coefficients de température dues au paramétrage PARASITE

Cette différence de précision entre l'ajustement Doppler et l'ajustement modérateur comme il a été vu au tableau 3.7 est due en effet au paramétrage cubique de la correction liée à l'effet Doppler de la section d'absorption épithermique de l'^{238}U. Le degré trois est encore insuffisant comme on peut le constater sur le tableau 4.4., car il introduit 17, - 25, - 10 et 0 pcm aux températures respectives T_c = 200, 286, 850 et 1500°C. Si l'ajustement de la correction correspondante à σ_{a3} ^{238}U était parfait (sans aucun écart avec la correction réelle), l'erreur (ΔC_θ Parasite) sur le coefficient Doppler aurait - 0.03, 0.03, 0.05 et - 0.03 pcm/°C ; donc une amplitude presque constante, ce qui améliore beaucoup les résultats DIANE pour l'effet Doppler.

b/ Ajustement des trous d'eau

Pour certaines températures du modérateur T_m = 200°C et T_m = 340°C, l'écart absolu sur le coefficient modérateur entre les calculs DIANE (avec activation) et APOLLO est supérieur à 1 pcm/°C, alors que ΔC_θ Parasite est largement inférieur à 1 pcm/°C à ces températures. Le tableau 4.16 montre l'écart absolu sur les coefficients de température entre les calculs DIANE utilisant des bibliothèques ponctuelles à contre-réaction et les calculs APOLLO. A partir de ce tableau et le précédent, il est facile de comprendre les sur-estimations par le calcul DIANE sur $C\theta_M$ du modérateur. Cette imprécision vient du fait d'une mauvaise compensation des erreurs sur $C\theta_M$ liées au paramétrage PARASITE et en grande partie au non ajustement des taux de réaction dans les cellules trou d'eau comme le montre le tableau 4.16. Ces compensations étaient favorables aux températures T_m = 286°C et T_m = 320°C à cause des signes opposés de $\Delta C\theta_M$ calculée et ceux du tableau 4.16.

c/ Conclusion

L'ajustement PARASITE des corrections liées aux effets de contre-réactions n'introduit que de faibles écarts sur le coefficient de température ; inférieurs à 1 pcm/°C pour l'effet modérateur quelle que soit la température du modérateur et mieux que 20 pcm entre T = 286 °C et T_c = 650°C. Le coefficient Doppler pourrait être mieux calculé si on tenait compte du spectre Doppler dans les hétérogénéités.

IV.5.2. Effets relatifs aux hypothèses de simplification des contre-réactions

Avant d'effectuer les calculs de coeur, on est conduit à connaître dans quelle mesure, les différentes hypothèses employées dans l'expression (1) du chapitre III peuvent prendre en compte les effets de contre-réaction. Les études portent successivement sur :

- l'indépendance des corrections multiplicatives dues aux effets de températures vis à vis de l'irradiation (0 et 24 000 MWJ/t) dans l'assemblage enrichi à 3.1 % sans poison et dans l'assemblage enrichi à 2.6 % avec 16 barreaux de pyrex à 0 MWJ/t
- la vérification de l'hypothèse de séparabilité des effets de contre-réaction
- la validité des corrections obtenues avec une concentration en bore égale 600 ppm, lorsque celle-ci est modifée.

TABLEAU 4.16 :

Assemblage : 3.1 % SP · 12 000 MWJ/t sans activation
600 ppm de bore

Comparaisons des coefficients de température entre DIANE (ponctuel) et APOLLO

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	$K\infty_D$ DIANE	$K\infty_A$ APOLLO	$\frac{K\infty_D - K\infty_A}{K\infty_A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.08733	1.08624	+ 100	- 11	- 11.07	- 0.93
286	650	1.07948	1.07918	+ 28	- 22.05	- 20.75	- 1.3
306	650	1.07473	1.07471	+ 2			
320	650	1.07013	1.07033	- 17	- 30.64	- 29.17	- 1.47
340	650	1.05865	1.05926	- 58	- 44.34	- 42.59	- 1.75
306	200	1.08901	1.08889	+ 11	- 2.93	- 2.93	0.0
306	286	1.08637	1.08628	+ 8	- 2.96	- 2.96	0.0
306	650	1.07473	1.07471	+ 2			
306	850	1.06975	1.06977	- 2	- 2.32	- 2.30	- 0.02
306	1500	1.05488	1.05500	- 11	- 2.19	- 2.16	- 0.03

IV.5.2.1. Liaison entre les corrections dues aux effets de contre-réactions et l'irradiation

La connaissance de l'erreur $\Delta\rho$ (voir tableau 4.13) induite par le paramétrage PARASITE et le calcul de diffusion (expression de la densité de l'eau, absence de correction dues à l'effet Doppler dans les trous d'eau) permet d'analyser l'optimisation de ces ajustements à des taux de combustion différents de 12 000 MWJ/t où ils étaient créés. La procédure décrite au paragraphe IV.5.1.3. pour déterminer $\Delta\rho$ est reprise pour évaluer les effets supplémentaires dûs à l'irradiation, $\Delta\rho$ est conservée pour une même température quand l'irradiation change.

A - Assemblage enrichi à 3.1 % sans poison, 600 ppm de bore

a/ Début de vie (0 MWJ/t)

A 0 MWJ/t, l'autoprotection est calculée au niveau de $\sigma(\tau)$, par conséquent il n'y a pas d'erreur sur la réactivité liée à cet effet (à 12 000 MWJ/t, elle valait - 89 pcm entre les calculs DIANE dans les conditions nominales). L'erreur due au paramétrage VELPO vaut - 49 pcm à cette irradiation (tableau 4.1).

Le tableau 4.17 montre les écarts absolus sur les coefficients de température entre les calculs DIANE (avec activation des effets de température) et les calculs APOLLO. La précision sur le coefficient de température modérateur est détériorée à 0 MWJ/t et ceci est d'autant plus vrai que la température du modérateur s'écarte d'avantage de T_m^* pour atteindre - 6.14 pcm/°C à T_m = 340°C. Dans ces écarts, il entre en ligne de compte l'erreur due au non ajustement des taux de réaction des trous d'eau (tableau 4.19) et en grande partie l'erreur liée à l'utilisation des corrections de contre-réaction (établies à 12 000 MWJ/t) à 0 MWJ/t ; cet effet est désigné par effet de l'irradiation ΔI en pcm. En faisant l'hypothèse de la conservation de $\Delta\rho$ (1) calculée, ΔI peut être déduit de la manière suivante :

$$\Delta I = \left(\text{Log}\ \frac{\lambda_D^A}{\lambda_D^P}\right) \times 10^{+5} \quad - \text{Ecart lié à l'autoprotection} - \text{Erreur liée à VELPO} - \Delta\rho\ \text{(calculée)}$$

Le tableau 4.18 met en évidence l'effet de l'irradiation ΔI sur les corrections et l'erreur ΔC_θ sur le coefficient de température C_θ aux différentes températures. ΔC_θ est pratiquement négligeable sur le coefficient Doppler et relativement important pour le modérateur.

TABLEAU 4.17 :

Assemblage : 3.1 % SP En début de vie (0 MWJ/t)

600 ppm de bore

Comparaisons des coefficients de température entre DIANE (avec activation) et APOLLO

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	$K\infty_D$ DIANE Activation	$K\infty_A$ APOLLO	$\frac{K\infty_D - K\infty_A}{K\infty_A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.21695	1.21272	+ 348	- 8.18	- 5.91	- 2.27
286	650	1.20992	1.20814	+ 147	- 14.35	- 12.40	- 1.95
306	650	1.20645	1.20515	+ 108			
320	650	1.20289	1.20212	+ 64	- 21.10	- 17.98	- 3.12
340	650	1.19295	1.19416	- 101	- 33.08	- 26.94	- 6.14
306	200	1.22127	1.21930	+ 162	- 2.71	- 2.59	- 0.12
306	286	1.21814	1.21680	+ 110	- 2.64	- 2.64	0.00
306	650	1.20645	1.20517	+ 108			
306	850	1.20111	1.20017	+ 78	- 2.23	- 2.08	- 0.15
306	1500	1.18571	1.18503	+ 57	- 2.04	- 1.98	- 0.06

T_m °C	T_c °C	λ_D^A DIANE activé	λ_D^P DIANE ponctuel	$\lambda_D^A-\lambda_D^P/\lambda_D^P$ (pcm)	$\Delta\rho^{(1)}$ (pcm)	ΔI (pcm)	ΔC_θ pcm/°C	C_θ APOLLO pcm/°C
200	650	1.21695	1.21558	+ 113	+ 16	+ 146	- 1.38	- 5.91
286	650	1.20992	1.21029	- 31	- 22	+ 40	- 2.00	- 12.40
320	650	1.20289	1.20382	- 77	15	- 43	- 3.07	- 17.98
340	650	1.19295	1.19542	- 207	- 20	- 138	- 4.06	- 2694
306	200	1.22127	1.22126	+ 1	+ 16	+ 34	- 0.08	- 2.59
306	286	1.21814	1.21876	- 51	- 22	+ 20	- 0.05	- 2.64
306	850	1.20111	1.20206	- 79	- 22	- 8	- 0.04	- 2.08
306	1500	1.18571	1.18681	- 93	- 10	- 34	- 0.04	- 1.98

TABLEAU 4.18 : Effet de l'irradiation sur les corrections liées aux effets de température (Assemblage 3.1 % sans poison, 0 MWJ/t 600 ppm de bore)

En fait, ces écarts importants sur le coefficient de température du modérateur sont liés à l'utilisation des corrections moyennées dans un spectre de neutrons thermiques dégradé par la présence d'une quantité significative de Plutonium 239 à 12 000 MWJ/t, mais n'altérant que très peu le coefficient Doppler.

Il est facile d'évaluer cet effet en reportant les corrections (faites à 12 000 MWJ/t) liées à l'effet modérateur à T_m = 200°C à celles qu'auraient les sections en début de vie en appliquant sur chacune des sections la formule de k∞ présentée au chapitre III. Le tableau 4.20 reprend les sections sensibles à l'effet de l'irradiation dans la cellule périphérique (k∞ = 1.21686 toutes les corrections sont à 0 MWJ/t).

Autrement dit, en écrivant que chaque section de la bibliothèque ponctuelle à T_m = 200 °C et 0 MWJ/t, sous forme de :

$$[\sigma(306,650)]^{0\ MWJ/t} \times \left[\frac{\sigma(200,650)}{\sigma(306,650)}\right]^{0\ MWJ/t}$$

on substitue le dernier terme par la correction correspondante calculée à 12 000 MWJ/t, d'où la nouvelle valeur de cette section

$$[\sigma(306,650)]^{0\ MWJ/t} \times \left[\frac{\sigma(200,650)}{\sigma(306,650)}\right]^{12\ 000\ MWJ/t}$$

les autres sections conservant leurs corrections réelles respectives à 0 MWJ/t. L'application de la formule du k∞ donne par comparaison à k∞ = 1,21688, la sensibilité à l'irradiation de la correction de température calculée pour chaque section à 12 000 MWJ/t.

---

(1) A 0 MWJ/t nous déduisons de Δρ la contribution du Plutonium

TABLEAU 4.19 :

Assemblage : 3.1 % SP 0 MWJ/t Sans activation DIANE

600 ppm de bore

Comparaisons des coefficients de température entre DIANE (ponctuel) et APOLLO

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	$K\infty_D$ DIANE ponctuel	$K\infty_A$ APOLLO	$\frac{K\infty_D - K\infty_A}{K\infty_A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	1.21558	1.21272	+ 236	- 6.65	- 5.91	- 0.74
286	650	1.21029	1.20814	+ 178	- 13.35	- 12.40	- 0.95
306	650	1.20704	1.20515	+ 157			
320	650	1.20382	1.20212	+ 141	- 19.08	- 17.98	- 1.10
340	650	1.19542	1.19416	+ 105	- 28.45	- 26.94	- 1.51
306	200	1.22126	1.21930	+ 161	- 2.60	- 2.59	- 0.01
306	286	1.21876	1.21680	+ 161	- 2.65	- 2.64	- 0.01
306	650	1.20704	1.20515	+ 157			
306	850	1.20206	1.20017	+ 157	- 2.08	- 2.08	- 0.00
306	1500	1.18681	1.18503	+ 150	- 1.99	- 1.98	- 0.01

TABLEAU 4.20 : *Effet partiel sur la réactivité induit par une section affectée d'une correction modérateur à 12 000 MWJ/t.*
Cellule périphérique de 3.1 % SP 0 MWJ/T, 600 ppm de bore, Tm = 200 °C

Section par isotope	Correction à 0 MWJ/t A	Correction à 12 000 MWJ/t B	$(\frac{A}{B} - 1) \times 10^{+5}$	$\frac{\Delta k_\infty}{K_\infty}$ (pcm)
$\sigma a4\ ^{235}U$	1.07885	1.08468	- 538	- 308
$\sigma f4\ ^{235}U$	1.08114	1.08665	- 507	413
$\sigma a3\ ^{238}U$	1.03533	1.03467	64	10
$\sigma a4\ ^{238}U$	1.06682	1.07105	- 395	- 31
$\Sigma_{a4}\ ^{10}$	0.92379	0.90905	1621	28
$\Sigma_{R3\to4}\ ^{10}$	1.25601	1.26478	- 694	100
			TOTAL =	+ 212 pcm

Ce tableau montre de manière évidente que les corrections établies à 12 000 MWJ/t ne sont pas conservées à 0 MWJ/t pour l'absorption thermique de l'^{235}U et la section de transfert épithermique du corps 10. Si toutes les corrections établies à 12 000 MWJ/t sont substituées à celles qui correspondent à 0 MWJ/t, elles augmenteraient la réactivité de 200 pcm, ce qui est compatible avec les résultats du tableau 4.18. Cependant si l'on pondérait cet écart de 200 pcm sur la cellule périphérique (+ 93 pcm sur la cellule latérale à un trou d'eau) par les flux au carré on retrouvera à peu près les 146 pcm dûs à l'effet de l'irradiation.

b/ 24 000 MWJ/t

Au taux de combustion de 24 000 MWJ/t, les résultats devraient être meilleurs qu'à 0 MWJ/t, où le spectre thermique ne serait que très peu perturbé par l'augmentation de la concentration du Plutonium et l'accumulation des produits de fission. Ceci peut être constaté sur le tableau 4.21 où le coefficient Doppler est toujours mieux estimé et une nette amélioration sur le coefficient du modérateur (à T_m = 340°C). Cette amélioration est liée à une compensation des erreurs sur le coefficient du modérateur introduites par l'effet de l'irradiation à 24 000 MWJ/t (tableau 4.22), qui dérive pour augmenter ce coefficient de plus de 2 pcm/°C à T_m = 340°C (dans les conditions nominales de températures, VELPO introduit + 22 pcm et l'autoprotection vaut - 105 pcm) et l'erreur induite par le non ajustement des taux de réactions dans les trous d'eau (tableau 4.23 comparaison des calculs DIANE Ponctuels et APOLLO à 24 000 MWJ/t).

TABLEAU 4.21 :

Assemblage : 3.1 % SP 24 000 MWJ/t 600 ppm de bore

Comparaisons des coefficients de température entre DIANE (avec activation) et APOLLO

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	$K\infty_D$ DIANE Activation	$K\infty_A$ APOLLO	$\frac{K\infty_D - K\infty_A}{K\infty_A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	0.98337	0.98471	- 136	- 10.68	- 10.17	- 0.51
286	650	0.97662	0.97870	- 213	- 21.80	- 23.30	+ 1.50
306	650	0.97220	0.97415	- 200			
320	650	0.96793	0.96960	- 172	- 32.54	- 33.44	+ 0.90
340	650	0.95633	0.95793	- 167	- 48.89	- 49.38	+ 0.49
306	200	0.98586	0.98768	- 184	- 3.09	- 3.06	- 0.03
306	286	0.98300	0.98519	- 223	- 3.03	- 3.09	+ 0.06
306	650	0.97220	0.97415	- 200			
306	850	0.96725	0.96934	- 216	- 2.57	- 2.49	- 0.08
306	1500	0.95335	0.95491	- 163	- 2.30	- 2.35	+ 0.05

T_m °C	T_c °C	λ_D^A DIANE activé	λ_D^P DIANE ponctuel	$\lambda_D^A - \lambda_D^P / \lambda_D^P$ (pcm)	$\Delta\rho$ (pcm)	ΔI (pcm)	ΔC_θ pcm/°C	C_θ APOLLO pcm/°C
200	650	0.98337	0.98452	- 117	16	- 50	+ 0.47	- 10.17
286	650	0.97662	0.97779	- 120	- 22	- 15	+ 0.75	- 23.30
320	650	0.96793	0.96829	- 37	15	31	+ 2.21	- 33.44
340	650	0.95633	0.95636	- 3	- 13	93	+ 2.74	- 49.38
306	200	0.98586	0.98666	- 81	16	- 14	+ 0.03	- 3.06
306	286	0.98300	0.98415	- 118	- 22	- 13	+ 0.04	- 3.09
306	850	0.96725	0.96815	- 92	- 22	13	+ 0.07	- 2.49
306	1500	0.95335	0.95364	- 30	- 10	63	+ 0.07	- 2.35

TABLEAU 4.22 : Effet de l'irradiation sur les corrections liées aux effets de température (assemblage 3.1 % sans poison, 24 000 MWJ/t, 600 ppm de bore)

Il est intéressant de connaître quels sont les isotopes responsables de cette erreur de 2.06 pcm/°C à T_m = 340°C. La méthode utilisée est semblable à celle qui a été décrite dans le cas de 0 MWJ/t au niveau de la cellule périphérique, c'est-à-dire au lieu de conserver la correction réelle,

$$\left[\sigma(340, 650)\right]^{24\ 000\ MWJ/t} = \left[\sigma(306, 650)\right]^{24\ 000\ MWJ/t} \times \left[\frac{\sigma(340,650)}{\sigma(306,650)}\right]^{24000\ MWJ/t}$$

elle est substituée par : $\left[\sigma(306,650)\right]^{24\ 000\ MWJ/t} \times \left[\frac{\sigma(340,650)}{\sigma(306,650)}\right]^{12\ 000\ MWJ/t}$

dans chaque section à tour de rôle. Ainsi, l'écart sur la réactivité (supérieur à 10 pcm) induit par chacune dessubstitutions, l'écart entre les corrections à 12 000 et 24 000 MWJ/t des sections des isotopes importants sont regroupés dans le tableau 4.24 (k^∞ = 0.94567 quand toutes les corrections sont à 24 000 MWJ/t).

TABLEAU 4.23 :

Assemblage : 3.1 % SP 24 000 MWJ/t Sans activation (ponctuel)
600 ppm de bore

Comparaisons des coefficients de température entre DIANE (ponctuel) et APOLLO

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	$K\infty_D$ DIANE Ponctuel	$K\infty_A$ APOLLO	$\frac{K\infty_D - K\infty_A}{K\infty_A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
200	650	0.98452	0.98471	- 19	- 11.09	- 10.17	- 0.92
286	650	0.97779	0.97870	- 93	- 24.50	- 23.30	- 1.20
306	650	0.97301	0.97415	- 117			
320	650	0.96829	0.96960	- 135	- 34.73	- 33.44	- 1.29
340	650	0.95636	0.95793	- 164	- 50.76	- 49.38	- 1.38
306	200	0.98666	0.98768	- 103	- 3.09	- 3.06	- 0.03
306	286	0.98415	0.98519	- 106	- 3.12	- 3.09	- 0.03
306	650	0.97301	0.97415	- 117			
306	850	0.96815	0.96934	- 123	- 2.52	- 2.49	- 0.03
306	1500	0.95364	0.95491	- 133	- 2.37	- 2.35	- 0.02

Section et Isotope	Correction à 24 000 MWJ/t A	Correction à 12 000 MWJ/t B	$(\frac{A}{B} - 1) \times 10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ (pcm)
$\sigma a4\ ^{235}U$	0.96724	0.96774	- 52	- 10
$\sigma f4\ ^{235}U$	0.96668	0.96709	- 42	12
$\sigma a4\ ^{239}Pu$	1.01760	1.01976	- 212	- 62
$\sigma f4\ ^{239}Pu$	1.01257	1.01469	- 209	84
$\sigma a3\ ^{240}Pu$	0.94254	0.95119	- 909	46
$\sigma f4\ ^{241}Pu$	0.98929	0.98790	- 140	10
Σa_3^{10}	0.49188	0.77026	- 36141	44
$\Sigma R_{3\to4}^{10}$	0.83979	0.84247	- 318	78
			Total =	+ 110 pcm

TABLEAU 4.24 : Effet partiel sur la réactivité induit par une section affectée d'une correction modérateur à 12 000 MWJ/t. Cellule périphérique de 3.1 % SP 24 000 MWJ/t, 600 ppm de bore, Tm = 340 °C

En réalité la somme de tous les $\Delta K\infty/K\infty$ est de + 98 pcm y compris ceux des isotopes induisant un $\Delta K\infty/K\infty$ < 10 pcm. Cette somme est proche de ΔI = 93 pcm dû à l'effet global (tableau 4.22) de l'irradiation sur les corrections à T_m = 340°C. Le tableau 4.24 met en évidence les réactions des isotopes dont les corrections sont plus influencées par l'irradiation, il faut incriminer l'absorption et la fission thermique du ^{239}Pu, l'absorption épithermique du ^{240}Pu, le transfert et l'absorption épithermique du corps 10. On note une participation très faible de l'^{235}U au bilan de réactivité due à sa faible concentration de noyaux, en revanche le Plutonium contribue de 80% à l'effet global (98 pcm). Ceci met en cause le choix de l'irradiation de référence à 12 000 MWJ/t à partir de laquelle l'effet du sepctre sur les sections n'est pas encore saturé.

La figure 4.2 montre la variation de l'écart sur le coefficient du modérateur dû à l'influence de l'irradiation sur les corrections liées à l'effet modérateur en fonction de la densité de l'eau. L'effet de l'irradiation en début de vie sur le coefficient du modérateur obtenu par un calcul utilisant les corrections établies à 12 000 MWJ/t est croissant avec la densité de l'eau ; il est décroissant pour l'irradiation de 24 000 MWJ/t.

La non prise en compte de l'équivalence Transport-Diffusion dans les trous d'eau induit un écart absolu sur le coefficient du modérateur entre les calculs APOLLO et DIANE Ponctuel (figure 4.3) qui est limité à 1.5 pcm/°C à T_m = 340 °C.

La résultante, à chaque température, de l'effet de l'irradiation et de la non prise en compte de l'équivalence Transport-Diffusion dans les trous d'eau conduit à un écart

absolu[1] sur le coefficient du modérateur entre DIANE et APOLLO (figure 4.4) qui varie identiquement que dans le cas de figure 4.2. Dans le cas de 24 000 MWJ/t, l'effet dû au non ajustement des trous d'eau compense l'effet de l'irradiation et contribue à l'augmenter en valeur absolue à 0 MWJ/t.

L'inversion du sens de variation de $\Delta C\theta_M$ (figure 4.2) à 0 et 24 000 MWJ/t vient du fait qu'à 0 MWJ/t la contribution ΔI (tableau 4.18) de l'effet de l'irradiation sur les corrections diminue la réactivité et elle l'augmente à 24 000 MWJ/t (tableau 4.21) quand la densité de l'eau décroit entre T_m = 200 et T_m = 340°C. Cette diminution (ou augmentation) de la réactivité est liée à l'écart existant entre les corrections établies à 12 000 MWJ/t et les corrections qu'auraient réellement les sections à 0 MWJ/t d'une part et 24 000 MWJ/t d'autre part. Cet écart augmente progressivement en valeur absolue (figures 4.5 à 4.9) au fur et à mesure que la température T_m s'écarte de part et d'autre de la température T_m^* en changeant de signe. Ainsi une correction établie à 12 000 MWJ/t qui contribue par exemple à augmenter la réactivité entre T_m = 200 et T_m = 306°C, contribue à diminuer la réactivité entre T_m = 306 et T_m = 340°C.

Compte tenu de ces remarques, on examine qualitativement la contribution ΔI à 0 et 24 000 MWJ/t lors des calculs DIANE avec activations ; entre T_m = 200 et T_m = 306°C, utilisant les corrections modérateur figées à l'irradiation référentielle.

A 0 MWJ/t les figures 4.5 et 4.7 montrent que les corrections établies à 12 000 MWJ/t surestiment les corrections réelles qu'auraient la section de fission[2] thermique de l'^{235}U, la section $\Sigma^{10}_{R3\to4}$ et sous-estiment Σ^{10}_{a4} (figure 4.8). De part et d'autre de T_m^* ces écarts induisent des effets sur la réactivité presque symétrique bien que les écarts en température ne le sont pas, ceci conduit à $\Delta C\theta_M$ décroissant.

A 24 000 MWJ/t, la figure 4.6 montre que les corrections de la section de fission[2] thermique du ^{239}Pu, de l'absorption épithermique du ^{240}Pu et de $\Sigma^{10}_{R3\to4}$ sont sous-estimées par les corrections utilisées dans les calculs ; et elles surestiment Σa_3^{10} [3] (figure 4.9). Les écarts entre les corrections à 12 000 et 24 000 MWJ/t ne présentent pas la même symétrie qu'à 0 MWJ/t, ce qui explique des contributions différentes de part et d'autre de T_m^*.

En conclusion, l'hypothèse de l'indépendance des corrections liées aux effets de température du modérateur par rapport à l'irradiation inflige des erreurs importantes sur le coefficient du modérateur et ceci est d'autant plus vrai en début de vie qu'à d'autres états d'irradiation. Un compromis pourrait être obtenu en calculant les bibliothèques à contre-réaction à un taux de combustion inférieur, par exemple 8 000 MWJ/t, où le spectre de neutron serait moins dégradé par le Plutonium et l'accumulation des produits de fission. Ceci présentera l'avantage d'une dérive

---

(1) A chaque température du modérateur l'erreur due à l'ajustement PARASITE ($\Delta\rho$ calculée) est déduite sur le coefficient du modérateur

(2) L'effet de la section de fission sur la réactivité est plus prépondérant que celui d'absorption par conséquent on ne représente que les corrections de la fission

(3) $\Sigma a3$ du corps 10 est négative, une surestimation de la correction correspondante conduit à augmenter la réactivité

constante au cours de l'évolution si le calcul coeur envisagé est limité au premier cycle (15 000 MWJ/t).

On rappelle que d'autres tests (7) ont été effectués sur des assemblages ayant des configurations différentes (enrichissement élevé, concentration en bore, géométrie) ont montré une approche suffisante du coefficient modérateur calculé par APOLLO ; confirmant ainsi la séparabilité des variables : irradiation et effets de contre-réaction. Peut-être faut-il attribuer ce résultat à l'enrichissement qui est deux fois supérieur à celui qu'on utilise.

B - Cas des poisons consommables

Avec le même souci, nous vérifions l'hypothèse de l'indépendance des corrections - liées aux effets de température - des absorbants vis à vis de l'irradiation. Le cas de l'assemblage enrichi à 2.6 % 16 barreaux de pyrex est retenu pour ce test à 0 MWJ/t où l'antiréactivité des poisons est importante. Le tableau 4.25 montre les écarts absolus sur les coefficients de température à 0 MWJ/t entre les calculs DIANE et APOLLO.

T_m °C	T_c °C	K_∞^D DIANE Activation	K_∞^A APOLLO	$\frac{K_\infty^D - K_\infty^A}{K^A}$ (pcm)	$C\theta_D$ DIANE	$C\theta_A$ APOLLO	$C\theta_D - C\theta_A$
286	650	1.00679	1.00765	- 85	- 17.71	- 21.28	+ 3.57
306	650	1.00323	1.00337	- 14			
320	650	0.99965	0.99960	+ 5	- 25.53	- 26.89	+ 1.36
306	286	1.01303	1.01321	- 17	- 2.66	- 2.67	+ 0.01

TABLEAU 4.25 : Comparaison des coefficients de température entre APOLLO et DIANE avec Activation (assemblage 2.6 % 16 BP ; 0 MWJ/t, 600 ppm de bore)

Le calcul DIANE sous-estime davantage le coefficient modérateur à T_m = 286°C comparé au calcul obtenu dans les mêmes conditions avec l'assemblage enrichi à 3.1 % sans poison. Le coefficient Doppler est toujours mieux estimé.

Ceci met en question les corrections liées à l'effet modérateur relatives à l'absorption du poison entre 0 et 12 000 MWJ/t. Le tableau 4.26 résume cette situation typique pour les assemblages empoisonnés, en comparant l'antiréactivité des poisons calculée par DIANE et APOLLO aux différentes températures à 0 et 12 000 MWJ/t ; sachant qu'à ces taux d'irradiation le poison ne présente pas la même efficacité.

A 12 000 MWJ/t l'écart absolu sur l'antiréactivité est presque inexistant, le résidu est attribué à la non prise en compte de l'ajustement de l'absorption épithermique, dont le poids est faible dans le bilan de réactivité. En effet à cette irradiation, la concentration du bore 10 dans le pyrex n'est que de 7 à 8 % de sa valeur initiale et par conséquent la tolérence sur la qualité du paramétrage sera grande.

Irradiation (MWJ/t)	T_m °C (T_c=650°C)	$\frac{\sigma_3(T_m,650)}{\sigma_3(306,650)}$ du pyrex	$\frac{\sigma_4(T_m,650)}{\sigma_4(306,650)}$ du pyrex	Antiréactivité des poisons consommables		$\rho_D-\rho_A$
				ρ^D_{Diane} (pcm)	ρ^A_{Apollo} (pcm)	
0	286	1.0647	1.00892	10 696	10 604	+ 92
	306	σ^*_3=136,10	σ^*_4=1378,9	10 674	10 640	+ 34
	320	0.99442	0.99355	10 652	10 656	- 4
12 000	286	1.00719	1.01544	1 631	1 633	- 2
	306	σ^*_3=147.36	σ^*_4=1955.7	1 610	1 607	+ 3
	320	0.99382	0.98896	1 584	1 586	- 2

TABLEAU 4.26 : Antiréactivité du poison calculée par DIANE et APOLLO à 0 et 12 000 MWJ/t sur l'assemblage 2.6 % 16 BP, 600 ppm de bore (σ^*_g section du pyrex dans les conditions nominales)

En début de vie, on remarque une dérive sur l'antiréactivité du poison de 100 pcm entre T_m = 286°C et T_m = 320°C du modérateur. Elle met en évidence le défaut de l'hypothèse de la conservation (durant tout le cycle) des effets de contre-réactions sur les sections microscopiques d'absorption du poison. En effet à 12 000 MWJ/t la correction des absorptions thermiques entre 286 et 320 °C est de 2.6 % alors qu'elle est de 1.5 % en début de vie, d'où la surestimation de l'antiréactivité des poisons.

IV.5.2.2. Calcul des contre-réactions avec couplage des températures

Il est intéressant d'examiner la validité de l'hypothèse de séparabilité des effets de température du modérateur et du combustible. Nous l'examinerons à 12 000 MWJ/t et à 600 ppm pour les températures de T_m = 286°C et T_c = 286°C qui existent réellement dans le coeur.

L'étude portera sur la comparaison des réactivités d'une part entre les calculs DIANE avec activation de l'effet modérateur et de l'effet Doppler et les calculs DIANE ponctuels utilisant la bibliothèque APOLLO dans les conditions citées ci-dessus. Les valeurs propres obtenues sont les suivantes :

DIANE avec activation T_m = 286°C, T_c = 286°C λ^A_D = 1.08928

DIANE ponctuel " " λ^P_D = 1.09080

APOLLO à " " λ_A = 1.09043

On note un écart entre les calculs DIANE avec et sans activation de - 139 pcm. Les

facteurs de normalisation de la distribution de puissance par composition édités par le calcul DIANE avec activation à T_m = 286°C et T_c = 286°C sont identiques à ceux des calculs DIANE obtenus par découplage de l'effet modérateur et l'effet Doppler. Par conséquent, l'incertitude due à l'ajustement PARASITE dans ces conditions, correspond à une chute de réactivité de - 35 pcm (voir tableau 4.13). Ces 35 pcm contiennent - 13 pcm[1] à T_m = 286°C et - 22 pcm à T_c = 286°C. L'erreur induite par l'ajustement PARASITE étant exclue, l'écart est de - 104 pcm entre la bibliothèque utilisant une correction réelle (c'est-à-dire $\sigma(T_m = 286, T_c = 286) / \sigma(T_m = 306, T_c = 650)$) et la bibliothèque utilisant les deux corrections multiplicatives découplées liées aux effets modérateur et Doppler :

$$\frac{\sigma(T_m = 286, T_c = 650)}{\sigma(T_m = 306, T_c = 650)} \times \frac{\sigma(T_m = 306, T_c = 286)}{\sigma(T_m = 306, T_c = 650)}$$

Si l'on déduit des - 104 pcm, l'incertitude due à VELPO (- 14 pcm) et l'erreur systématique (- 89 pcm) due à l'autoprotection des noyaux résonnants non prise en compte dans une bibliothèque évolutive (voir 4.5.1.3.), il ne subsiste pratiquement aucun écart.

Ce test confirme suffisamment l'hypothèse de séparabilité des effets modérateur et Doppler ; peut être, faut-il attribuer ce résultat à des compensations des écarts très faibles entre les corrections réelles et les corrections découplées (car ces températures ne sont pas très éloignées des conditions nominales) ? Par ailleurs, des tests analogues ont été faits dans d'autres projets, confirmant ce résultat [7].

L'écart absolu sur le coefficient de puissance entre le calcul DIANE et le calcul APOLLO (respectivement - 14.48 pcm/% P_N et - 14.52 pcm/% P_N) est 0.04 pcm/% P_N, P_N est la valeur de la puissance nominale.

En conclusion, l'hypothèse de séparabilité des effets modérateur et Doppler est satisfaisante pour estimer correctement le coefficient de puissance.

IV.5.2.3. Influence de la concentration du bore

Les corrections liées aux effets ont été établies dans les conditions nominales d'irradiation et de la concentration moyenne en bore 600 ppm. Dans la réalité physique, le titre en bore soluble décroit au cours de l'évolution.

Une concentration élevée en bore C_B augmente le coefficient modérateur $C_{\theta M}$; et il est intéressant d'analyser l'influence de cette concentration C_B sur les corrections multiplicatives.

Nous donnons les valeurs propres λ fournies par les calculs APOLLO et DIANE à 12 000 MWJ/t, C_B = 1330 ppm dans les conditions nominales de températures (306 - 650) et à (T_m = 286, T_c = 650).

---

(1) Dans ce cas particulier une correction a pu être faite pour que T_m soit à 286°C.

T_m °C T_c = 650°C	λ_D^A DIANE avec activation	λ_D^P DIANE ponctuel	λ_A APOLLO
306	1.01041	1.01162	1.01087
286	1.01057	1.01221	1.01118
$C_{\theta M}$(pcm/°C)	- 0.8	- 2.9	- 1.55
$C_{\theta M} \times \Delta T$ (pcm) (ΔT = - 20°C)	16	58	31

TABLEAU 4.27 : Coefficients de température modérateur de l'assemblage 3.1 % SP 12 000 MWJ/t, 1330 ppm de bore

Dans ces conditions (à 1330 ppm), le calcul DIANE sous-estime le coefficient de température de 0.60 pcm/°C en valeur absolue alors qu'avec 600 ppm DIANE sur-estime ce coefficient de 0.21 pcm/°C. Le calcul dérive de 0.81 pcm/°C. Nous allons essayer d'analyser les causes de cet écart.

A - Influence de la concentration du bore sur la contre-réaction modérateur

Ce test repose sur l'expression des sections efficaces utilisée dans DIANE (on pose C_{BO} = 600 ppm, C_B = 1330 ppm).

$$\sigma(T_m=286,\ T_c=650)^{CB} = \sigma(T_m=306,\ T_c=650)^{CB} \times \left[\frac{\sigma(T_m=286,\ T_c=650)}{\sigma(T_m=306,\ T_c=650)} \right]^{CB}$$

Le rapport $\left[\frac{\sigma(T_m=286)}{\sigma(T_m=306)} \right]$ qui corrige les sections efficaces de l'effet de température modérateur, au lieu d'être calculé à la concentration C_B (soit 1330 ppm) il est calculé à C_{BO} soit 600 ppm. Cette substitution est considérée en première approximation dans la cellule périphérique, le tableau suivant résume les résultats pour les isotopes les plus importants dans l'effet modérateur (tableau 4.28).

L'application de l'expression (2) du $k\infty$ (voir III.A.4) sur la bibliothèque à T_m = 286°C T_c=650°C, C_B = 1330 ppm et 12 000 MWJ/t donne $k\infty$ = 1.01136.

Type de section et isotope	1330 ppm $A=\frac{\sigma(286,650)}{\sigma(306,650)}$	600 ppm $B=\frac{\sigma(286,650)}{\sigma(306.650)}$	$(A/B-1) \times 10^{+5}$	$\frac{\Delta k\infty}{K\infty}$ (pcm)
$\sigma a4\ ^{235}U$	0.98428	0.98374	- 55	- 16
$\sigma f4^{235}U$	0.98395	0.98340	- 56	26
$\sigma a4\ ^{238}U$	0.98666	0.98619	- 47	- 3
$\sigma a4\ ^{239}Pu$	1.00971	1.01036	64	13
$\sigma f4\ ^{239}Pu$	1.00726	1.00764	38	- 11
$\sigma a4$ Eau	0.98393	0.98338	- 55	- 2
$\sigma a4$ Bore	0.98400	0.98343	- 57	- 5
$\sigma a4$ PF	0.98392	0.98327	- 66	- 1
$\Sigma a4$ Corps 10	1.01623	1.01730	105	2
$\Sigma_{R3\to4}$	0.93700	0.93719	21	- 4
			TOTAL =	- 1 pcm

TABLEAU 4.28 : Effet de chaque correction modérateur établie à 600 ppm sur la réactivité. Cellule périphérique de l'assemblage 3.1 % sans poison. 12 000 MWJ/t 1330 ppm de bore

On remarque que les erreurs induites sur la réactivité par l'utilisation à 1330 ppm des corrections établies à 600 ppm sont dans l'ensemble modérées et se compensent puisqu'il ne reste que + 2 pcm dans le bilan global (dans le tableau 4.28 on note un total de - 1 pcm, en fait la contribution très faible des autres isotopes ramène le total à + 2 pcm). Ceci permet de conclure sans équivoque que l'influence de la concentration de bore sur les corrections liées à l'effet modérateur est négligeable.

La recherche doit être orientée vers une éventuelle influence de la concentration sur les sections nominales qui proviennent de l'évolution APOLLO avec une concentration de bore constante à 600 ppm.

B - Influence de la concentration de bore sur les sections nominales

Le procédé d'analyse utilisé est décrit au chapitre III qui est effectué au niveau de la cellule périphérique, en permutant les sections efficaces une à une entre les bibliothèques nominales, ayant les deux concentrations en bore 1330 et 600 ppm.

Le tableau suivant 4.29 montre l'erreur sur la réactivité induite par le simple fait

d'utiliser une section pondérée par un spectre à 600 ppm au lieu d'une section pondérée par un spectre à 1330 ppm.

Ces écarts montrent que les sections efficaces ne peuvent être considérées comme indépendantes de la concentration en bore ; le spectre de neutrons thermiques à 1330 ppm est plus dur, ce qui se traduit par une diminution des sections efficaces.

Presque toutes les sections thermiques contribuent de manière assez sensible au bilan de réactivité et plus particulièrement celles de l'^{235}U et le ^{239}Pu. L'ensemble de ces effets se compense pour n'introduire qu'un faible écart sur la réactivité dans les conditions nominales.

La contribution totale de tous les isotopes y compris ceux qui ne sont pas cités dans le tableau (contribution inférieure à 10 pcm) est de + 1 pcm.

Type de section et isotope	Valeur de la section dans les conditions nominales		$(\frac{A}{B}-1) \times 10^{+5}$	$\frac{\Delta K\infty}{K\infty}$ (pcm)
	1330 ppm (A)	600 ppm (B)		
$\sigma a4\ ^{235}U$	296.88	300.07	- 1063	- 307
$\sigma f4\ ^{235}U$	252.51	255.27	- 1081	493
$\sigma a3\ ^{238}U$	2.2609	2.2581	124	22
$\sigma a4\ ^{238}U$	1.3165	1.3286	- 911	- 56
$\sigma a4\ ^{239}Pu$	1081.0	1073.0	746	156
$\sigma f4\ ^{239}Pu$	693.71	689.70	581	- 170
$\sigma f4\ ^{241}Pu$	662.38	665.72	- 502	12
$\sigma a4$ Xe	1376500	1400900	- 1742	- 44
$\sigma a4$ Eau	0.36309	0.36695	- 1052	- 36
$\sigma a4$ Bore	419.92	424.35	- 1044	- 90
$\sigma a4$ PF	8.9869	9.0635	- 845	- 16
$\Sigma a4$ corps 10	0.0028995	0.0028129	3079	59
$\Sigma_{R1\to2}$	0.063308	0.063484	- 277	- 14
$\Sigma_{R2\to3}$	0.056618	0.056327	516	- 12
$\Sigma_{R3\to4}$	0.050097	0.050137	- 81	16
			TOTAL =	+ 13 pcm

TABLEAU 4.29 : K∞ = 1.00959 de la cellule périphérique 3.1% sans poison 12 000 MWJ/t 1330 ppm de bore

Ce propos est confirmé par le test suivant :

Dans un calcul DIANE, utilisant la bibliothèque ponctuelle APOLLO à 600 ppm, 12 000 MWJ/t à T_m = 306°C et T_c = 650 °C, les densités de bore ont été remplacées par celles correspondantes à 1330 ppm. Ce calcul fournit un $K\infty$ = 1.01159, comparé à la valeur $K\infty$ = 1.01162 obtenue à partir de la bibliothèque ponctuelle à 1330 ppm donne un écart de - 3 pcm.

Par ailleurs, l'effet de la variation de bore sur les sections d'une bibliothèque contre-réactive à une température du modérateur différente de la température nominale, est légèrement sensible. On note une chute de réactivité de 15 pcm si on substituait les concentrations en bore de 600 ppm à celles de 1330 ppm dans la bibliothèque établie à 600 ppm et à T_m = 286°C.

Cet effet supplémentaire est lié, à la fois, à la variation de la température et à la variation de la concentration de bore. Si on prend en compte des 2 pcm dûs aux corrections modérateur (voir IV.7.3.1.), on obtient une différence de réactivité de - 12 pcm, entre le calcul DIANE activé à T_m = 286°C et le calcul APOLLO, dûe à une variation de température de - 20°C.

Cet écart de - 12 pcm introduit une erreur de + 0.6 pcm/°C sur le coefficient modérateur dans le calcul DIANE, ce qui explique partiellement la dérive sur la différence absolue constatée sur les coefficients de température calculés à 600 et 1330 ppm.

Nous pouvons conclure que l'effet d'une variation de la concentration du bore (de l'ordre de 700 ppm) au voisinage des conditions nominales de température est :

- négligeable sur les corrections liées à l'effet modérateur (+ 2 pcm)
- très faible sur les sections nominales (- 3 pcm)
- relativement sensible sur les sections non nominales (- 15 pcm à T_m = 286°C).

IV.5.3. Résumé

Nous avons analysé dans ce chapitre les effets de certains paramètres (irradiation, bore, couplage des effets de contre-réactions) sur les corrections modérateur et Doppler dans les assemblages enrichis à 3.1 % sans poison et à 2.6 % avec 16 barreaux de pyrex. Les conditions de référence sont : 12 000 MWJ/t, T_m = 306, T_c = 650°C à 600 ppm de bore. Les effets de chacun de ces paramètres sont découplés afin de pouvoir évaluer l'effet de chacun d'eux sur les corrections lorsque les autres sont fixés dans les conditions de référence.

Assemblage 3.1 % SP à 12 000 MWJ/t et 600 ppm de bore -

L'erreur induite par le paramétrage PARASITE sur le coefficient modérateur reste inférieure à 1 pcm/°C dans tout le domaine de température du modérateur. L'erreur induite sur le coefficient Doppler intégré est inférieure à 20 pcm entre T_c = 286°C et T_c = 650°C, elle n'excède pas 30 pcm entre T_c = 650 et les trois autres températures (T_c = 200 ; 850 ; 1500°C).

Le code de diffusion DIANE ne pouvant prendre en considération l'effet du spectre Doppler dans les compositions non fissiles dû aux cellules combustibles voisines, conduit à une erreur de 0.02 pcm/°C sur le coefficient Doppler (soit 20 pcm sur la réactivité pour une variation de température du combustible de 850°C), mais elle ne perturbe pas la distribution de puissance.

Assemblage 3.1 % SP à 0 et 24 000 MWJ/t , 600 ppm de bore

L'effet de l'irradiation sur les corrections établies à 12 000 MWJ/t est beaucoup plus important en début de vie qu'à 24 000 MWJ/t sur le coefficient modérateur, cet effet est lié à la dégradation du spectre thermique par la variation d'une quantité significative de Plutonium et ne concerne que très peu l'effet Doppler. De ce fait, les corrections liées à l'effet modérateur dépendent sensiblement de l'irradiation.

Assemblage 2.6 % 16 BP à 0 MWJ/t et 600 ppm de bore

Le coefficient modérateur à T_m = 286°C est sous-estimé en valeur absolue par le calcul DIANE à cause de la sur-estimation des corrections d'absorption du poison à 0 MWJ/t. L'effet de l'irradiation sur ces corrections a tendance à sous-estimer l'antiréactivité du poison quand la densité d'eau diminue ; elle est sans effet sur les corrections Doppler.

Assemblage 3.1 % SP à 12 000 MWJ/t et 600 ppm de bore

L'hypothèse de séparabilité de l'effet modérateur et de l'effet Doppler, sur les corrections, est confirmée par le test entre chaud puissance nulle ($T_m = T_c$ = 286°C) et chaud pleine puissance (T_m = 306, T_c = 650°C). L'erreur sur le coefficient de puissance n'est que de 0.04 pcm par pour cent de la puissance nominale.

Assemblage 3.1 % SP à 12 000 MWJ/t et 1330 ppm de bore

L'influence de la concentration en bore sur les corrections modérateur au voisinage de la température nominale de l'eau est modérée, de plus il y a compensation des effets sur la réactivité dûs à chacune des corrections. En revanche, les sections nominales sont très sensibles à la concentration en bore en particulier ; pour l'Uranium 235 et le Plutonium 239, ces effets sur l'absorption et la fission se compensent de façon à presque annuler l'effet sur la réactivité de chacune des sections.

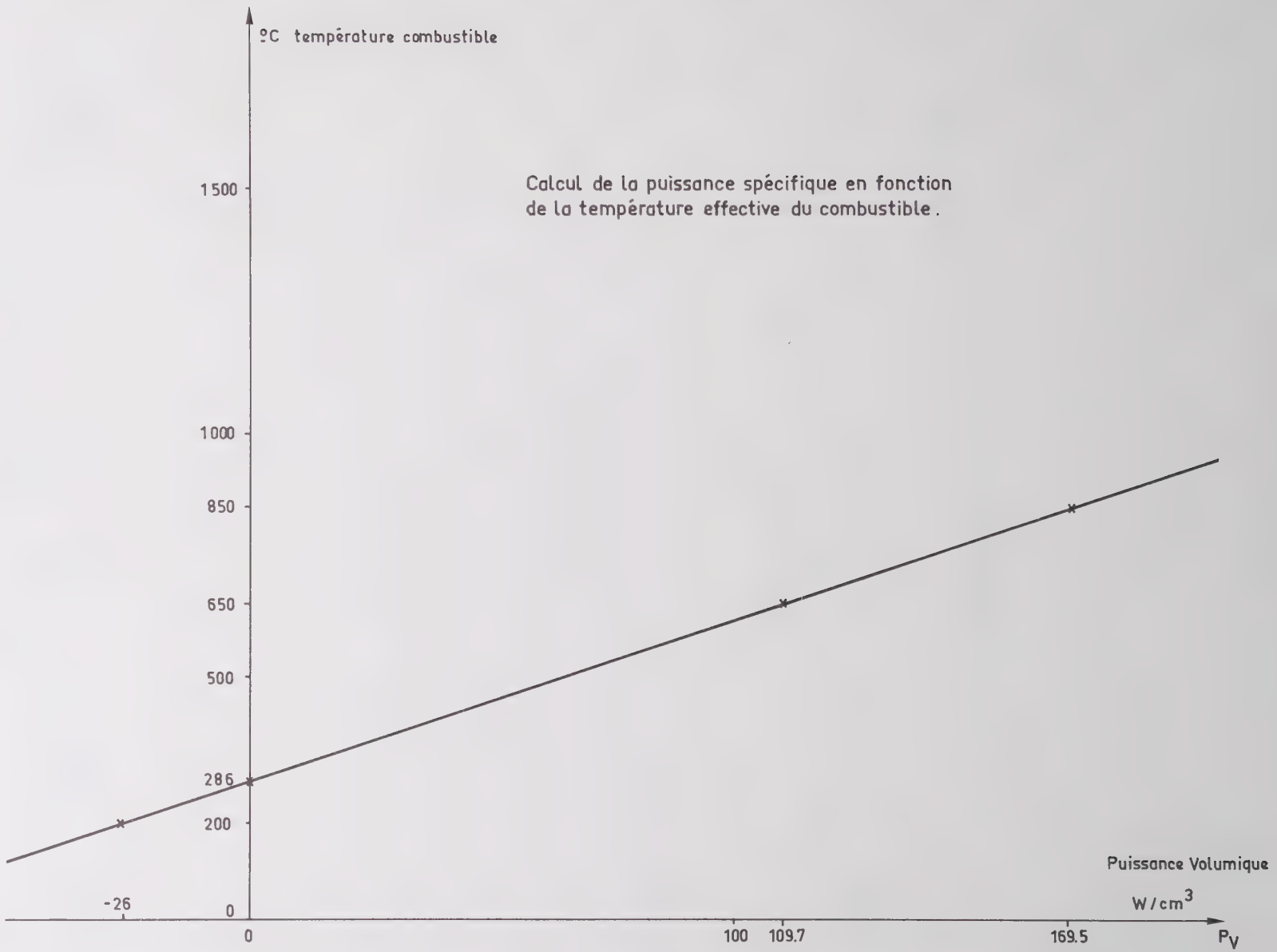

°C température combustible
Calcul de la puissance spécifique en fonction
de la température effective du combustible.
1500
1000
850
650
500
286
200
0
-26
0
100
109.7
169.5
Puissance Volumique
W/cm3
Pv

Fig. 4_1

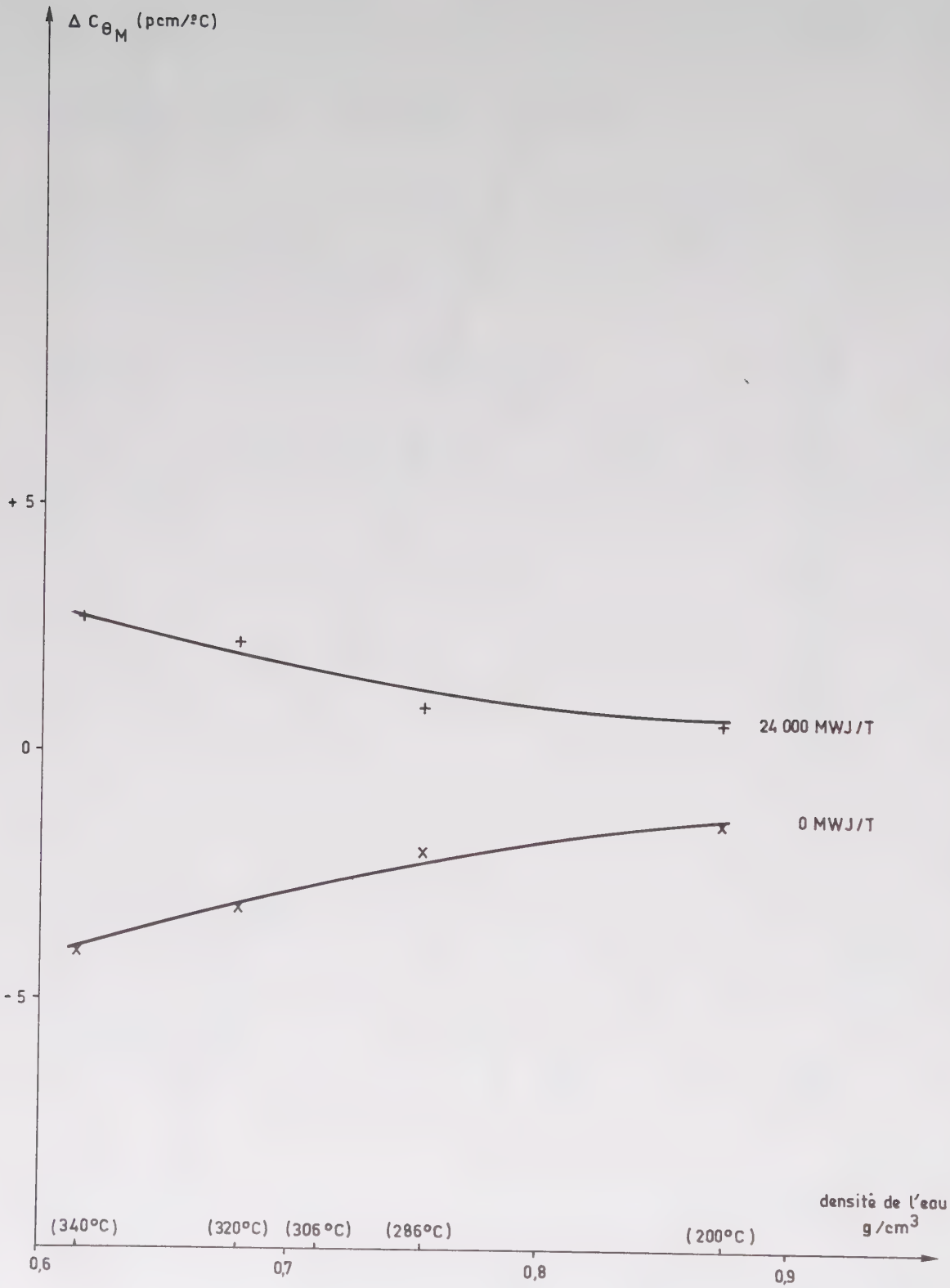


Fig.4.2: Incertitude sur le coefficient modérateur due à l'influence de l'irradiation sur les corrections liées à l'effet modérateur.

Evolution de l'écart absolu entre DIANE et APOLLO sur le coefficient de température du modérateur

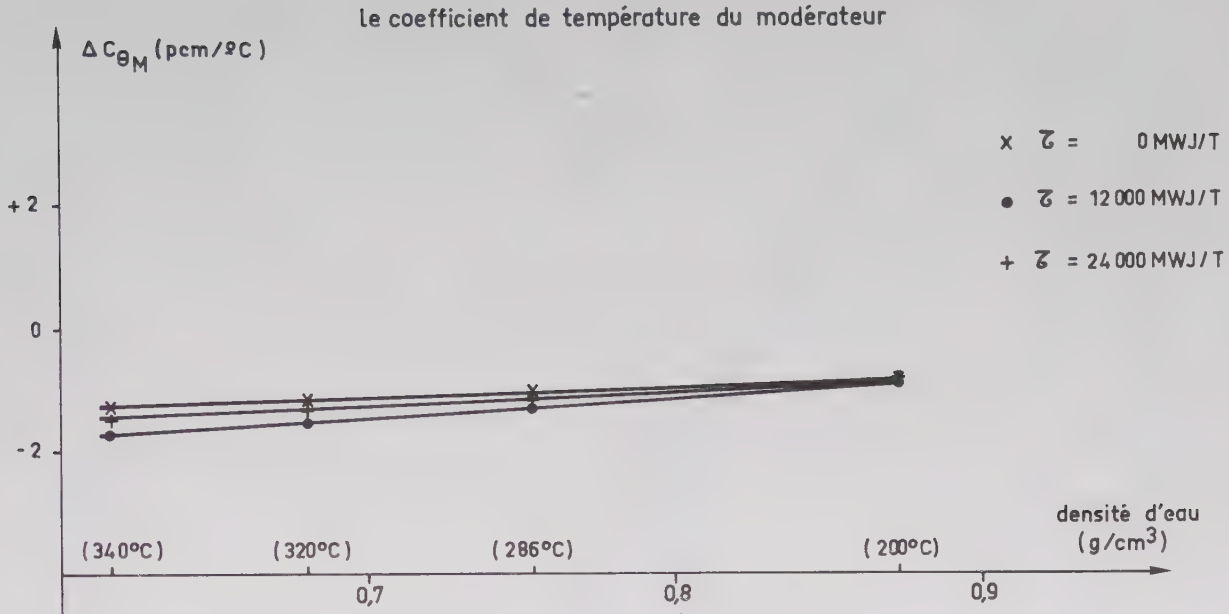


Fig. 4.3 : C_{θ_D} (Ponctuel) - C_{θ_A}

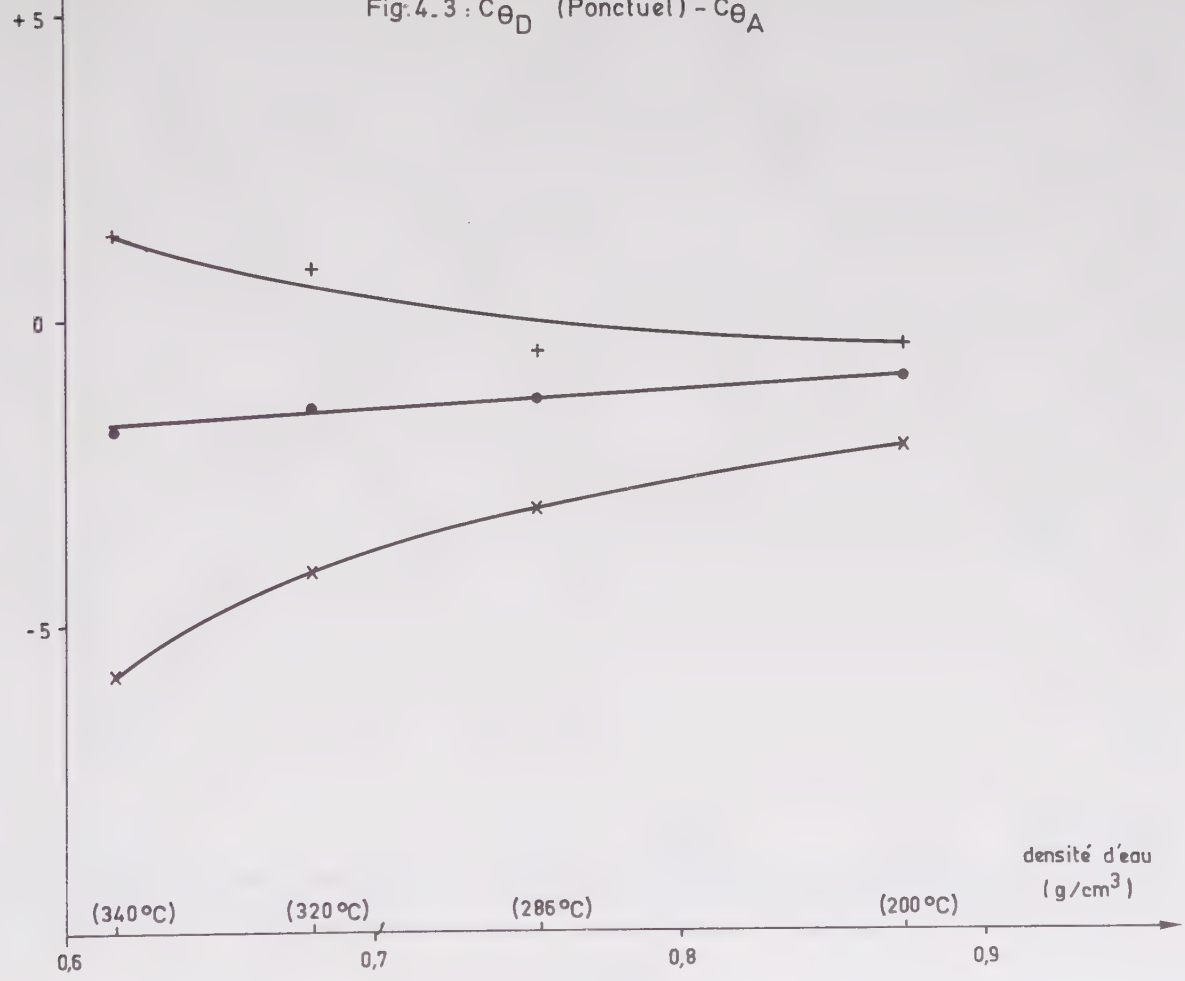


Fig. 4.4 : C_{θ_D} (Activé) - C_{θ_A}

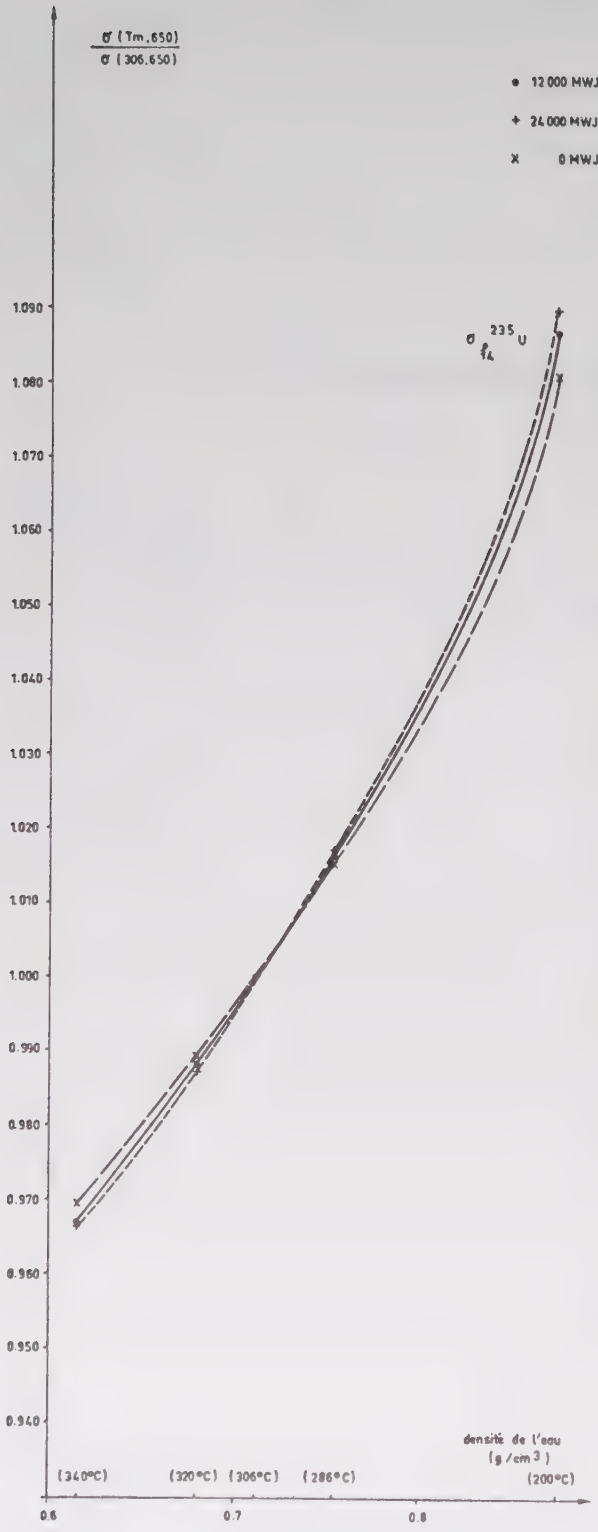

σ (Tm,650) / σ (306,650)
• 12 000 MWJ/T
+ 24 000 MWJ/T
x 0 MWJ/T
σ f4 235U
densité de l'eau (g/cm3)
(340°C) (320°C) (306°C) (286°C) (200°C)

Fig. 4.5

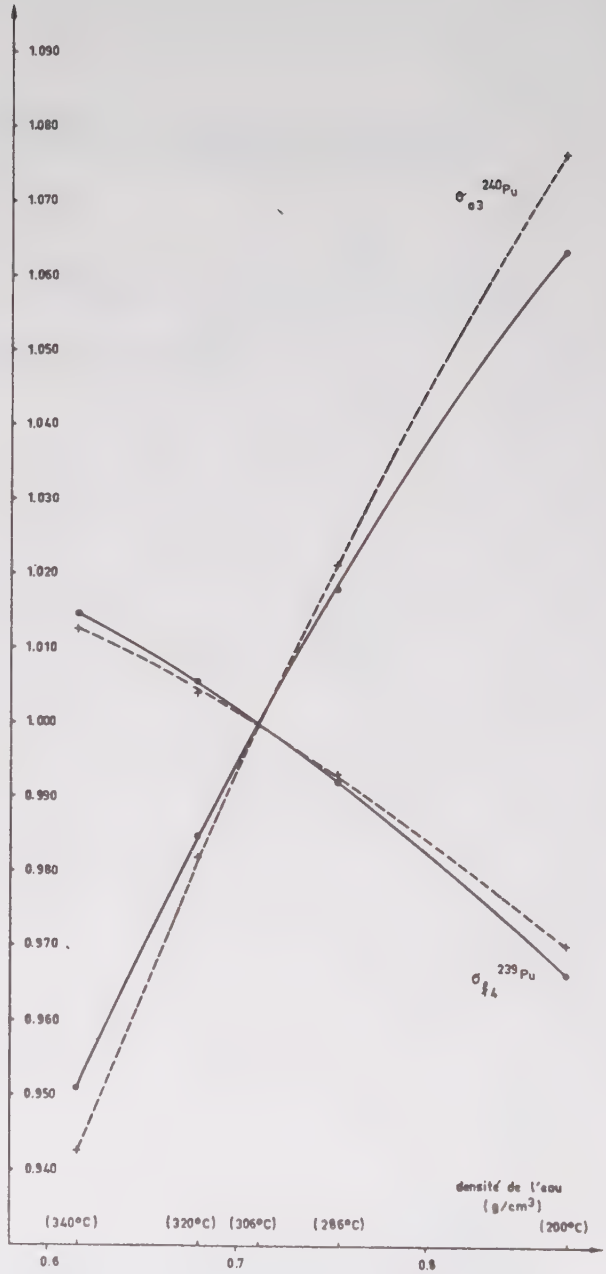

σ a3 240Pu
σ f4 239Pu
densité de l'eau (g/cm3)
(340°C) (320°C) (306°C) (286°C) (200°C)

Fig. 4.6

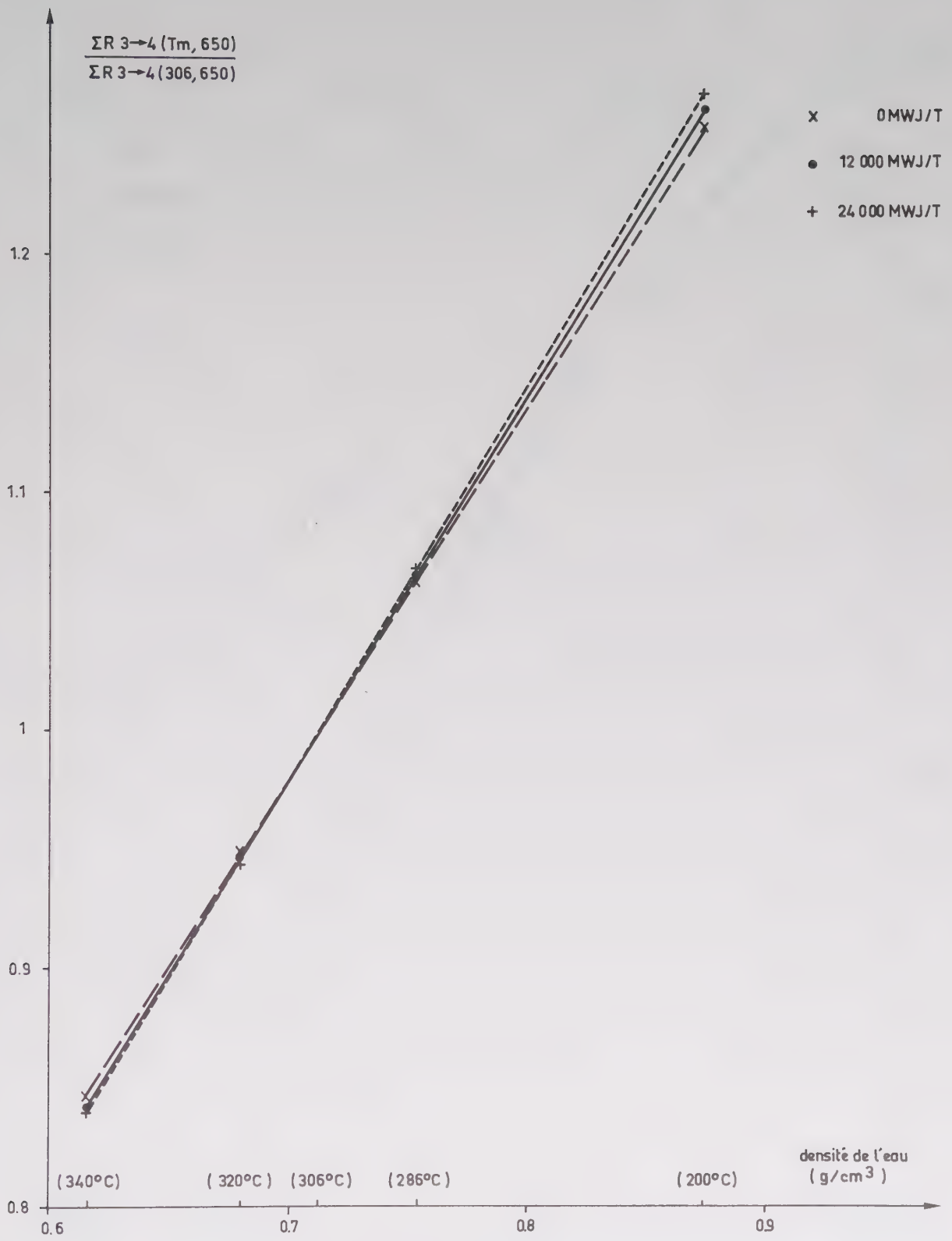

ΣR 3→4 (Tm, 650)
ΣR 3→4 (306, 650)
x 0 MWJ/T
• 12 000 MWJ/T
+ 24 000 MWJ/T
1.2
1.1
1
0.9
0.8
0.6
0.7
0.8
0.9
(340°C)
(320°C)
(306°C)
(286°C)
(200°C)
densité de l'eau
(g/cm3)

Fig. 4.7

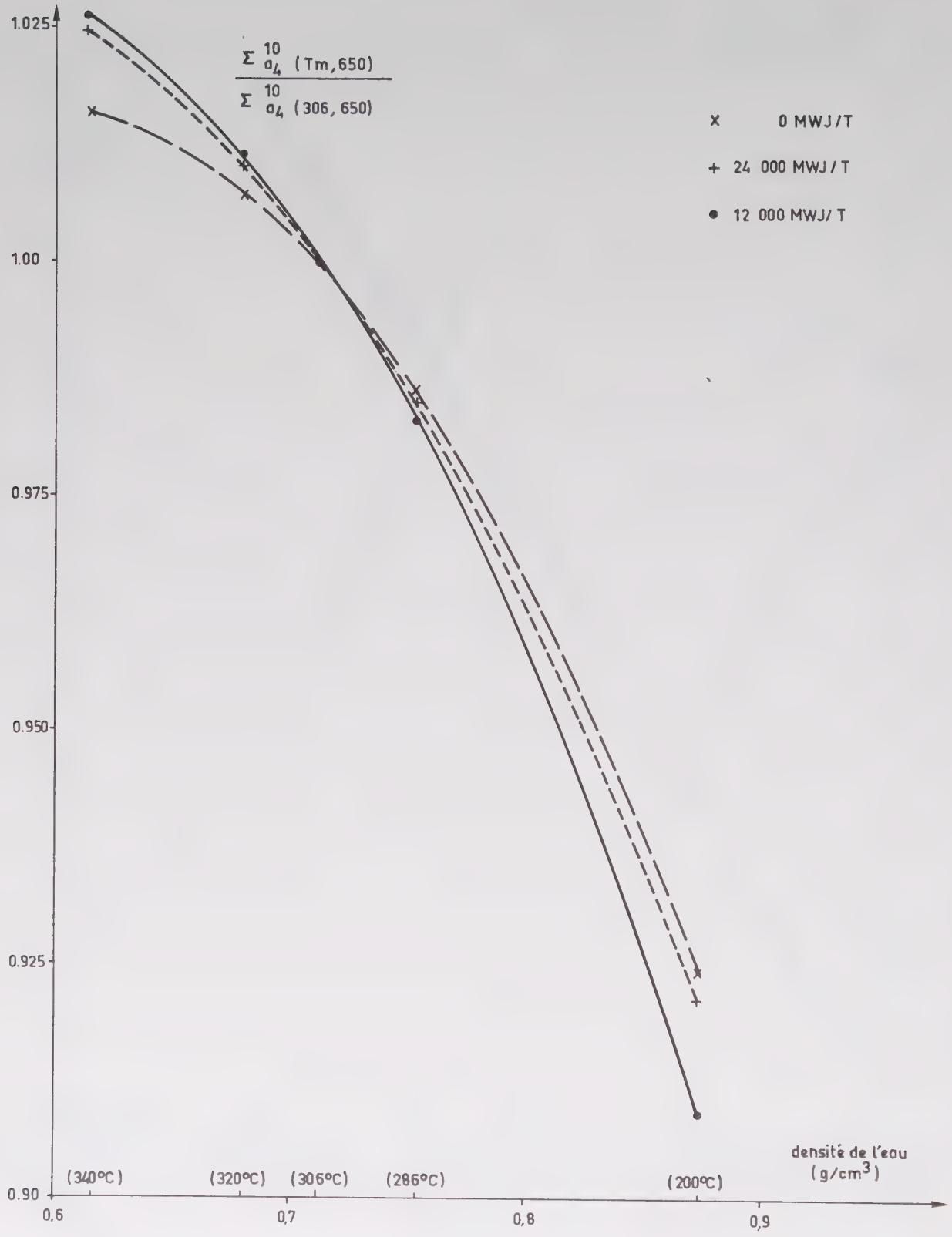

1.025
1.00
0.975
0.950
0.925
0.90
$\frac{\Sigma\ ^{10}_{a_4}\ (Tm, 650)}{\Sigma\ ^{10}_{a_4}\ (306, 650)}$
× 0 MWJ/T
+ 24 000 MWJ/T
• 12 000 MWJ/T
(340°C)
(320°C)
(306°C)
(286°C)
(200°C)
densité de l'eau (g/cm³)
0,6
0,7
0,8
0,9

Fig. 4.8

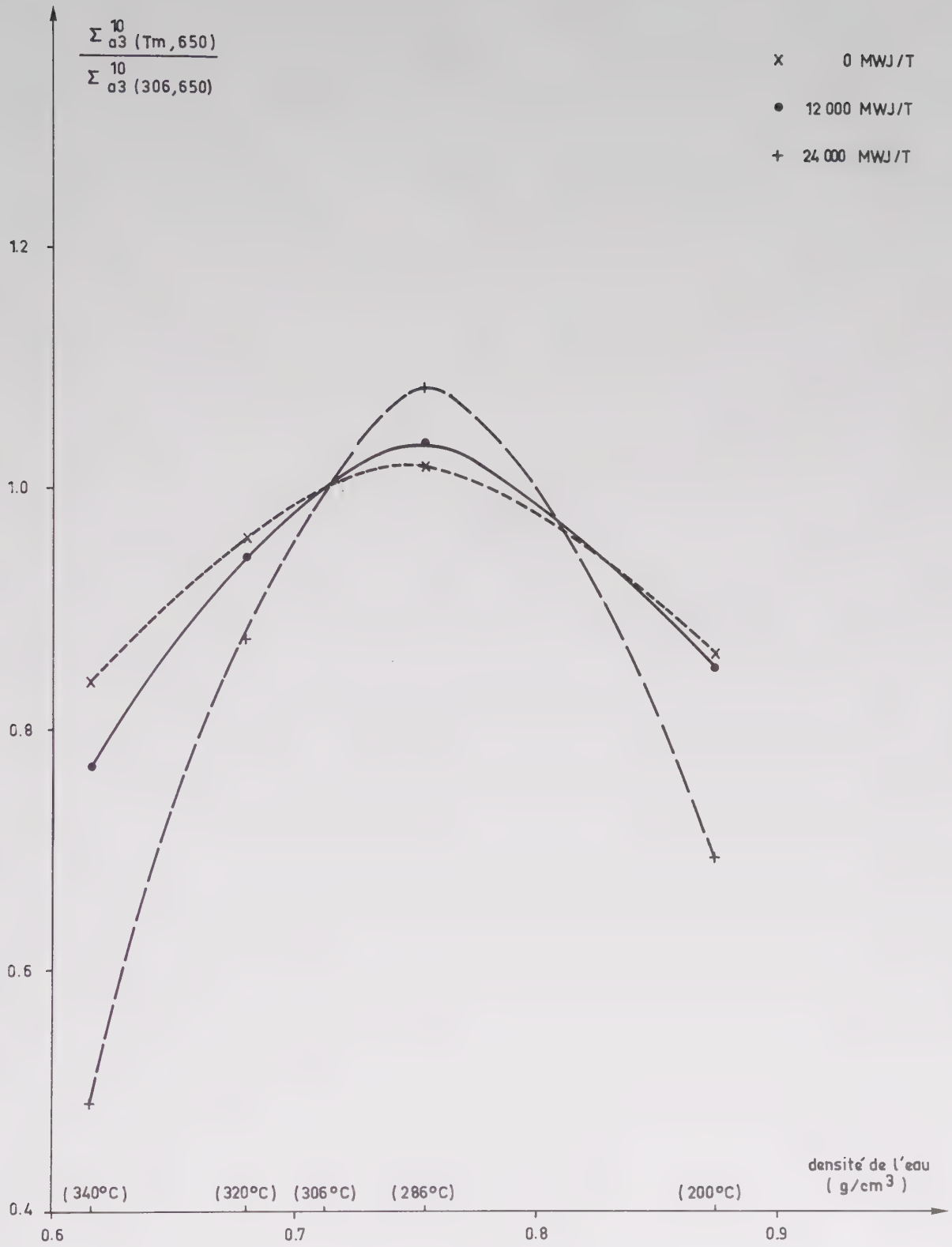

$\frac{\Sigma^{10}_{a3}(Tm, 650)}{\Sigma^{10}_{a3}(306, 650)}$
x 0 MWJ/T
• 12 000 MWJ/T
+ 24 000 MWJ/T
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.6
0.7
0.8
0.9
(340°C)
(320°C)
(306°C)
(286°C)
(200°C)
densité de l'eau
(g/cm 3)

Fig. 4.9

CHAPITRE V

CALCUL DU PREMIER CYCLE DU COEUR FESSENHEIM

V.1. - INTRODUCTION

Les études effectuées sur les sections efficaces microscopiques et sur les calculs d'assemblages ont été étendues à un calcul de coeur. Les analyses antérieures ont porté sur les divers paramètres ayant un poids important dans le bilan neutronique tels que : l'influence du bore, les poisons consommables, l'irradiation. L'influence de chacun de ces principaux paramètres a été étudiée en les supposant indépendants pour évaluer l'effet de chacun d'eux sur le bilan de réactivité. Nous essayons de mettre à profit la tendance de l'ensemble de ces paramètres dans les calculs de coeur effectués par DIANE.

Les calculs de coeur qui suivent, sont faits à raison d'une maille par cellule et portent sur la partie radiale. Les températures et la pression sont moyennées entre l'entrée et la sortie du modérateur dans le coeur, par conséquent l'effet 2D/3D n'est pas pris en compte (la distribution axiale du flux n'étant pas uniforme et variant d'un assemblage à un autre). Ces calculs ne prennent pas en compte les phénomènes transitoires du Xénon dûs à la montée en puissance. Cependant la durée d'un niveau de puissance a été préalablement déterminée pour éliminer des incertitudes éventuelles dues à ces effets.

L'étude du premier cycle du coeur de FESSENHEIM à l'aide du code DIANE (en tenant compte des contre-réactions) permet la comparaison avec l'expérience : mesures de réactivité et d'activités à différents taux d'irradiation.

V.2. - CONDITIONS DU CALCUL

V.2.1. - CONFIGURATION GEOMETRIQUE

Les calculs du coeur s'effectueront sur le quart de la géométrie réelle avec un découpage radial de 136 points suivant les deux dimensions de la partie combustible. Les assemblages enrichis à 2.1 et 2.6 % sont disposés en damier au centre du coeur, ceux qui sont enrichis à 3.1 % entourent les deux premiers assemblages (voir plan de chargement figure 1.2). Le réflecteur latéral d'épaisseur 21,6 cm, vient augmenter ce découpage à 154 points. Il est constitué par un baffle en acier et de l'eau borée. Le réflecteur est représenté de la périphérie au centre du coeur, par trois types de milieu disposés dans l'ordre suivant :

- milieu "eau"
- " "acier + eau"
- " "acier" (baffle)

Les réflecteurs axiaux ne seront pas représentés (calcul à 2D). Pour calculer l'activité ($\Sigma_f \Phi$), la chambre à fission est introduite dans la cellule trou d'eau centrale de chaque assemblage. On ne représentera que la partie fissile (^{235}U) de cette chambre à fission.

V.2.2. - CONSTANTES NEUTRONIQUES DU REFLECTEUR

Les constantes neutroniques du réflecteur sont déterminées dans le schéma à quatre groupes d'énergie à partir d'un calcul de traverse APOLLO [8].

Seul l'isotope du bore soluble est représenté explicitement, les autres sont groupés dans le corps 10.

Toutes les sections sont considérées constantes au cours de l'évolution. Les corrections de l'effet modérateur portent sur toutes les sections de diffusion, de transfert et d'absorption thermique des milieux contenant de l'eau. Le milieu baffle ne compte que les corrections de la densité d'eau des sections d'absorption thermique et de transfert épithermique du corps 10.

V.2.3. - CONSTANTES NEUTRONIQUES DE LA CHAMBRE A FISSION

Les sections de fission de l'^{235}U sont également issues d'un calcul APOLLO spécifique pour chaque type d'assemblage. Elles sont considérées constantes au cours de l'évolution (variation inférieure à 0.6 %). Seules les corrections de l'effet modérateur sur ces sections sont prises en compte et considérées comme linéaires en fonction de la densité de l'eau ; l'effet Doppler n'est pas pris en compte à cause de l'enrichissement élevé en Uranium 235.

V.2.4. - AJUSTEMENT DE LA REACTIVITE EN EVOLUTION : REACTIONS (n,2n)

Le calcul de la réactivité (k_{eff}) en évolution par DIANE à partir des bibliothèques fournies directement par le calcul de transport APOLLO est sous-estimée de 150 pcm environ. En effet, dans ces bibliothèques, il n'y a pas de sections qui représentent les réactions (n,2n) qui sont induites principalement par l'isotope de l'Uranium 238 dans le domaine des neutrons rapides (groupe 1). Par conséquent il nous a paru légitime d'en tenir compte dans le calcul d'évolution du coeur.

La correction proposée consiste en l'introduction d'une section fictive au niveau du corps 10 (concentration égale à 1) dans chaque composition fissile et pour chaque assemblage : Si P, A et F désignent respectivement la production, l'absorption et les fuites des neutrons dans un calcul APOLLO alors :

$$k_{eff} = \frac{P}{A + F} \qquad \text{avec} \qquad P = \sum \nu\Sigma_f \, \Phi$$

$$A = \sum \Sigma_a \, \Phi$$

$$F = \sum DB^2 \, \Phi$$

la réactivité $\Delta\rho(n,2n)$ qui correspond aux réactions (n,2n) s'écrit :

$$\Delta\rho(n,2n) = \frac{\Delta k_{eff}}{k_{eff}} = \frac{\Delta P}{P}$$

$$k_{eff} = \frac{P + \Delta P}{A + F} = \frac{P(1 + \Delta(n,2n))}{A + P} \neq 1$$

On rappelle que dans le calcul APOLLO la production est normalisée à 1 ($P \tilde{\sim} 1$) d'où

$$\Delta\rho(n,2n) = \nu^1 \sigma_{f1} \Phi_1$$

Φ_1 est le flux rapide intégré dans toute la cellule combustible.

Si $\nu^1 = 1$ on en déduit

$$\sigma_{f1}^{10} = \frac{\Delta\rho(n,2n)}{\Phi_1}$$

La figure 5.1 montre pour les cas des assemblages enrichis à 2.1 et 3.1 % sans poison l'évolution de $\Delta\rho(n,2n)$ en fonction de l'usure du combustible. $\Delta\rho(n,2n)$ est de + 20 pcm plus importante pour l'assemblage enrichi à 2.1 %.

En fait dans les calculs, $\Delta\rho(n,2n)$ a été supposé constant en évolution et surestimé. Nous avons dû aussi en particulier rajouter les sections de fissions du Plutonium 240 qui manquaient. Ces sections sont introduites dans le corps 10 et variables avec l'irradiation.

La figure 5.2 montre les écarts sur le facteur de multiplication effectif entre les calculs DIANE et APOLLO en évolution avant et après correction dans les bibliothèques. Malgré ces corrections, il subsiste un écart entre les deux calculs (qui peut atteindre - 200 pcm pour l'assemblage 2.1 % sans poison). Ceci est dû d'une part à une incohérence entre les sorties APOLLO à une irradiation donnée et la valeur du k_{eff} correspondante (pour les valeurs élevées des pas de temps en évolution), d'autre part à la discrétisation spatiale pour le calcul du flux par DIANE.

V.3. - DONNEES EXPERIMENTALES

Les données expérimentales dont on dispose sont :

- l'activité par assemblage
- la concentration critique en bore soluble
- le taux de combustion auquel sont effectuées ces mesures
- le niveau de puissance

Les tableaux 5.1 et 5.2 regroupent toutes ces données expérimentales ainsi que les valeurs du Laplacien B^2_Z simulant les fuites axiales qui sont déduites d'un calcul d'évolution où le coeur a été assimilé à un point. La dernière valeur de l'irradiation correspond à la fin du premier cycle.

Les relevés d'activités expérimentales sont effectués sur 57 plans axiaux dans les assemblages prévus pour recevoir la chambre à fission (voir figure 1.7). Ensuite les valeurs d'activités dans chaque assemblage sont intégrées sur toute la hauteur fissile et normalisées.

Irradiation (MWJ/T)	Puissance (MW)	C_B * (ppm)
0	5 % PN	1325**
280	50 % PN	1025
500	73 % PN	983
1173	100 % PN	898
2748	100 % PN	860
4000	100 % PN	805
5363	100 % PN	730
6500	100 % PN	660
7755	100 % PN	572
9000	100 % PN	485
10844	100 % PN	352
13340	100 % PN	137
14979	100 % PN	19

Tableau 5.1 _ Evolution de la concentration en bore soluble.

* C_B : concentration en bore soluble.

** Cas sans xénon.

Irradiation (MWJ/T)	Laplacien axial
0	0.68 E-04
280	0.88 E-04
500	0.96 E-04
1173	1.20 E-04
2748	1.62 E-04
4000	1.85 E-04
5363	2.00 E-04
6500	2.08 E-04
7755	2.14 E-04
9000	2.19 E-04
10844	2.28 E-04
13340	2.38 E-04
14979	2.44 E-04

Tableau 5.2 _ Evolution du Laplacien axial en fonction du taux de combustion.

On peut estimer que les activités expérimentales sont mesurées en moyenne avec une précision de 2%.

V.4. - COMPARAISONS DES RESULTATS ENTRE CALCULS ET EXPERIENCES

Les comparaisons porteront sur la réactivité et les cartes d'activité entre calcul et expérience, ces dernières ne concernent que les points de mesures suivants :

0, 280, 1173 et 13 340 MWJ/T.

V.4.1. - REACTIVITE

On suppose que la criticité est obtenue à chaque pas d'irradiation correspondant à la concentration critique de bore. Le tableau 5.3 et la figure 5.3 représentent l'évolution de la réactivité obtenue.

Irradiation (MWJ/T)	Valeur propre	Réactivité (pcm)
0 sans Xénon	1.00296	+ 296
280	1.00046	+ 46
500	0.99987	- 13
1173	1.00104	+ 104
2748	0.99739	- 261
4000	0.99509	- 492
5363	0.99336	- 666
6500	0.99247	- 756
7755	0.99200	- 803
9000	0.99133	- 870
10844	0.98996	- 1010
13340	0.98931	- 1075

TABLEAU 5.3 - EVOLUTION DE LA REACTIVITE AVEC LE CALCUL DIANE

V.4.2. - COMPARAISON DES ACTIVITES

V.4.2.1. - Début de vie

En début de vie et à 5% de la puissance nominale, on dispose de 3 cartes d'activités expérimentales correspondantes à 3 coeurs identiques :

- FESSENHEIM 1
- " 2
- BUGEY 2

Ces cartes d'activité présentent une dispersion de mesure avec certaines valeurs d'activité aberrantes (supérieures à 3%). Il était impératif de procéder, dans chaque assemblage instrumenté à une moyenne des activités des 3 coeurs. Ensuite par rabattement symétrique sur le huitième de coeur on élimine les points de mesures aberrants, on obtient ainsi une carte d'activité corrigée.

Résultat -

Le tableau 5.4 montre les écarts relatifs - en pour cent - entre les valeurs d'activité expérimentales corrigées et les valeurs d'activité calculées. On constate que le calcul DIANE sous-estime l'activité au centre et à la périphérie du coeur. Elle est sur-estimée dans la zone intermédiaire. En moyenne les assemblages enrichis à :

C C E E −1%

C = Calcul
E = Expérience

				1,001 1,004 − 0,29	0,560 0,562 −0,36			A
			1,246 1,245 0,08	0,887 0,882 0,57	0,749 0,743 0,81	0,543 0,544 − 0,18		B
		1,305 1,326 − 1,58	0,986 0,993 − 0,70	1,275 1,270 0,39	0,937 0,943 − 0,64	0,821 0,821 0,00		C
	1,237 1,262 −1,98	0,976 0,993 −1,71	1,305 1,319 −1,06	1,016 1,029 −1,26	1,353 1,319 2,58	0,862 0,863 −0,12	0,581 0,586 −0,85	D
assemblage central →		1,257 1,274 −1,33	0,954 0,961 −0,73	1,358 1,352 0,44	1,083 1,070 1,21	1,312 1,253 4,71	0,753 0,742 1,48	E
	8	7	6	5	4	3	2	1

Tableau 5–4. Comparaison des activités entre le calcul DIANE et l'expérience à 0 MWJ/T ; 5% PN et 1325 ppm de bore. (sans xénon)

2.1 % présentent un écart moyen + 0.06 %

2.6 % " " " " - 0.26 %

3.1 % " " " " + 0.002 %

Dans les assemblages périphériques enrichis à 3.1 %, ceux qui présentent deux faces au réflecteur, les activités calculées correspondantes sont plus sous-estimées que dans les assemblages ayant une seule face en commun avec le réflecteur. Ils présentent respectivement les écarts moyens de - 0.44 % et + 0.74 %. Cet effet est appelé "effet de coin".

L'assemblage E2 présente un écart très important, il faut incriminer ce résultat à la dispersion de mesures sur les 3 coeurs. Par exemple, l'écart d'activité entre le calcul et chacune des mesures des trois coeurs sur cet assemblage :

- + 4.37 % par rapport Fessenheim 2
- + 0.08 % " " " 1
- + 5.04 % " " Bugey 2

La même remarque peut être appliquée pour l'assemblage D3. Cet écart n'est que de + 1.20 % avec Fessenheim 1.

V.4.2.2. - 280 MWJ/T

On présente à partir de cette irradiation (50 % de la puissance nominale) les écarts calcul-expérience des activités sur le coeur entier pour éviter les points de mesures experimentaux qui semblent aberrants (tableau 5.5).

A ce niveau de puissance, un début de basculement entre le centre et la périphérie du coeur sur les écarts. Ainsi une augmentation au centre et une diminution des écarts dans les assemblages périphériques. Les assemblages enrichis à

2.1 % présentent un écart moyen de 0.08 %

2.6 % " " " " de 0.85 %

3.1 % " " " " de - 1.80 %

Dans le calcul DIANE, les assemblages avec barreaux de pyrex ont vu leurs activités augmenter par rapport au calcul effectué à 5% PN. Cette augmentation s'explique par la diminution des corrections des sections d'absorption du poison liées à l'effet modérateur.

L'assemblage D7 présente un écart important sur l'activité de 4%, alors que l'assemblage qui lui est symétrique J12 l'écart n'est que de 2.7 %. Cette différence peut être liée à la considération symétrique du calcul sur le quart de coeur. La même remarque est valable pour les assemblages A9 et J15. Les assemblages ayant deux faces avec le réflecteur présentent un écart moyen de - 2.34 % présentant une seule face, ils ont un écart moyen de 1.51 %.

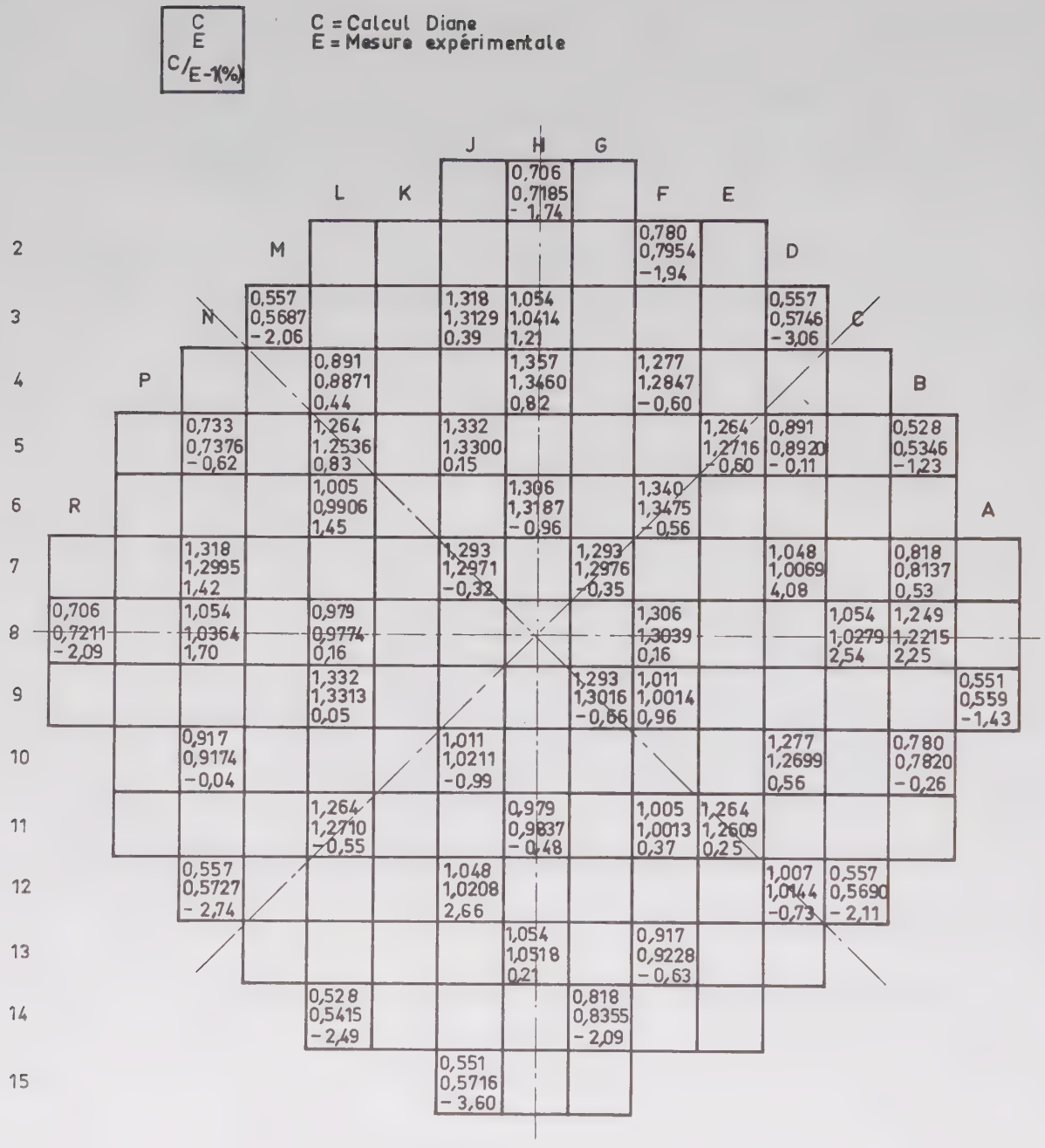


Tableau 5-5 . Comparaison des activités entre le calcul DIANE et l'expérience à 280 MWJ/T 50 % PN et 1025 ppm de bore .

V.4.2.3. - 1173 MWJ/T

La puissance nominale est atteinte à ce taux de combustion. L'écart augmente en valeur absolue dans les assemblages périphériques. Les activités sont sous-estimées par le calcul DIANE, ce sont les assemblages qui présentent l'effet de coin qui accusent les écarts les plus importants comme le montre le tableau 5.6. Les écarts calcul-expérience diminuent radialement du centre à la périphérie et correspondent à un basculement plus accentué. En moyenne, les assemblages enrichis à :

2.1 % présentent un écart de . 0.98 %

2.6 % " " " de . 0.80 %

3.1 % " " " de - 4.25 %

L'effet de damier est pratiquement inexistant (0.18 %). Parmi les assemblages en périphérie, ceux qui ont deux faces communes au réflecteur présentent un écart moyen de - 4.89 % alors que les assemblages ayant une seule face avec le réflecteur présentent un écart moyen de - 4.23 %. Notons que les assemblages avec un coin rentrant présentent un écart moyen de - 2.60 %.

V.4.2.4. - 13 340 MWJ/T

Le tableau 5.7 montre les écarts relatifs entre les activités calculées et expérimentales vers la fin du premier cycle à 13 340 MWJ/T, 137 ppm et à 100% de la puissance nominale. Le basculement sur la carte d'activité calculée entre le centre et la périphérie est plus remarquable. On note :

un écart moyen de 1.63 % pour les assemblages à 2.1 %

un écart moyen de 0.35 % pour les assemblages à 2.6 %

un écart moyen de - 4.50 % pour les assemblages à 3.1 %

C'est à partir de cette irradiation que l'effet de damier se manifeste nettement, avec une amplitude de 1.28 %. Ceci peut mettre en cause plusieurs facteurs qu'on évoquera dans la suite.

Les assemblages présentant deux faces aux réflecteurs ont un écart moyen de - 4.61 % et ceux qui présentent une seule face ont un écart moyen de - 5.18 % et ceux avec un coin rentrant de - 3.30 %.

V.5. - SOURCES D'ERREURS

A l'issue de ces résultats qui ont montré des écarts importants tant sur la réactivité que sur la carte d'activité en périphérie du coeur entre l'expérience et le calcul, nous allons tenter d'énumérer les causes pouvant induire de tels écarts.

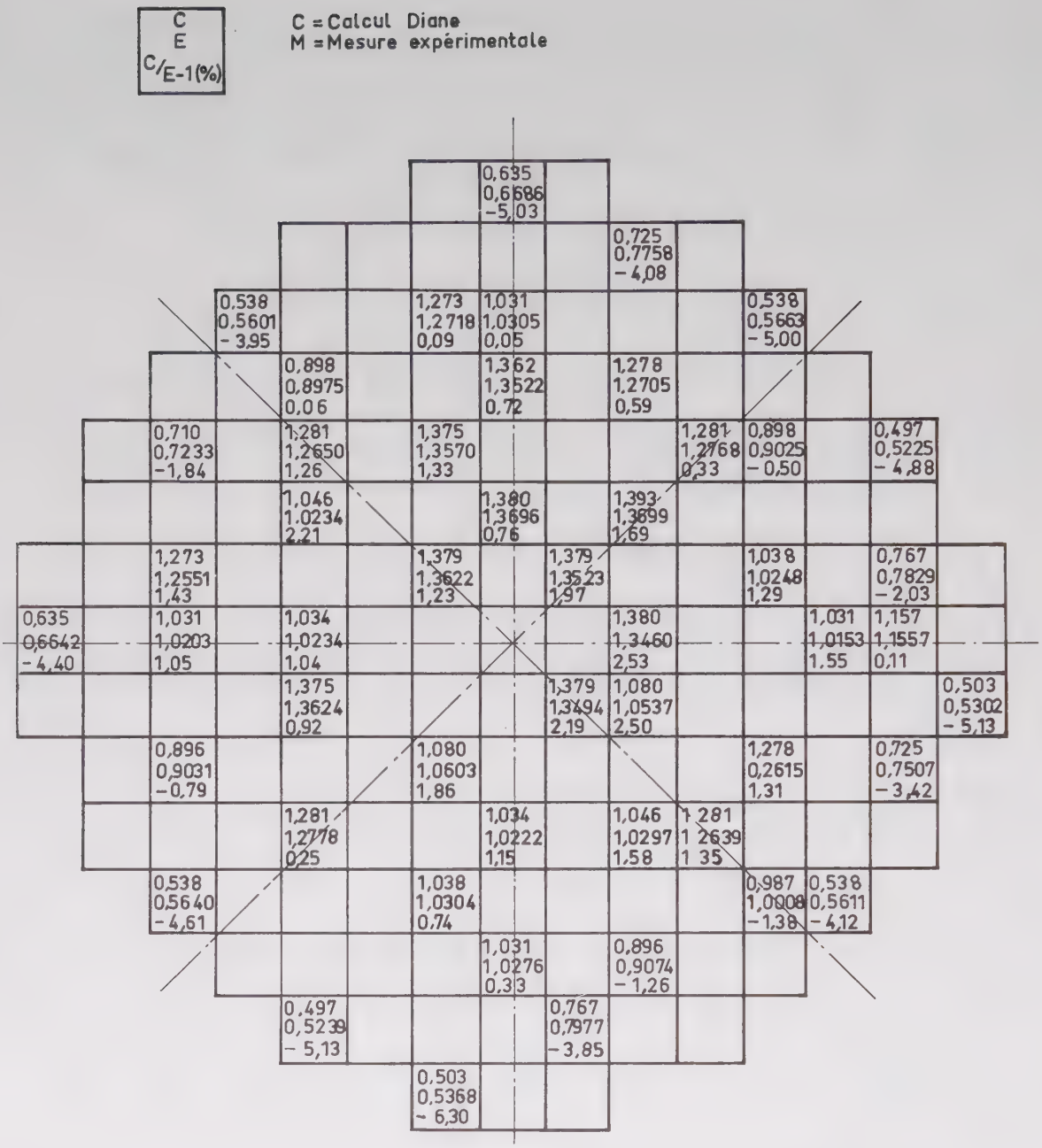


Tableau 5_6. Comparaison des activités entre le calcul DIANE et l'expérience à 1173 MWJ/T, 100 % PN et 898 ppm de bore.

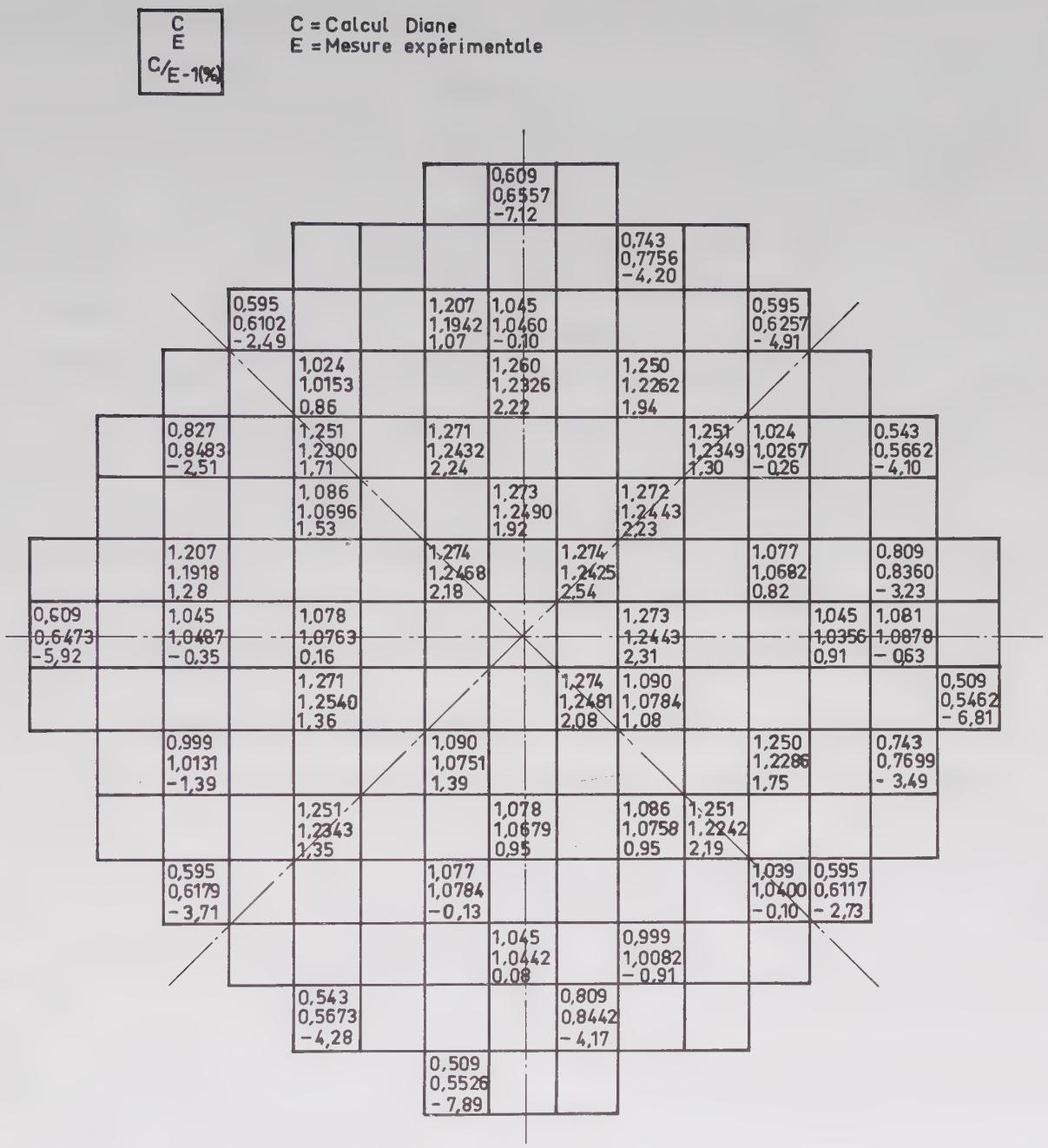


Tableau 5_7. Comparaison des activités entre le calcul DIANE et l'expérience à 13340 MW J/T, 100 % PN et 137 ppm de bore.

V.5.1. - REACTIVITE

V.5.1.1. - En début de vie la réactivité est surestimée; plusieurs facteurs peuvent être invoqués :

- l'introduction d'une production supplémentaire de neutrons due aux réactions (n,2n) surestime la réactivité d'une cinquantaine de pcm comme le montre la figure 5.2
- aux fortes concentrations de bore, DIANE a tendance à surestimer le flux
- le calcul de transport APOLLO, option multicellule sous-estime l'efficacité des poisons de 2 à 3%
- une faible sur-estimation due à ν du groupe rapide
- longueur des pas d'évolution APOLLO considérée assez grande pour l'assemblage enrichi à 3.1 % sans poison
- calcul sans xénon à 0 MWJ/T,

V.5.1.2. A partir de 2500 MWJ/T DIANE sous-estime la réactivité, la figure 5.2 fournit une explication partielle, on en déduit que le calcul DIANE sous estime le flux en évolution et à fortiori quand la concentration en bore diminue

- l'autoprotection de l'^{235}U, l'^{238}U et le ^{239}Pu n'est pas recalculée ce qui pénalise la réactivité
- la température effective du combustible qui diminue en évolution
- les assemblages périphériques dans un gradient de flux important ne sont pas traités correctement

V.5.2. - INTERPRETATION DES CARTES D'ACTIVITE

A partir de 1173 MWJ/T l'activité au centre est surestimée par rapport à la périphérie du coeur, ceci nous conduit à penser à deux hypothèses possibles : soit un mauvais calcul des constantes neutroniques dans un des types d'assemblage soit le calcul du réflecteur.

A propos de la première hypothèse, nous mentionnons un test [9] montrant que le calcul des constantes neutroniques - en particulier celles de la chambre à fission - par APOLLO en option multicellule dépend du nombre de cellules combustible qui les différentie. Cet effet induit un écart de l'ordre de + 8 % (1) sur le flux dans la chambre à fission et par suite une erreur sur les sections microscopiques de l'^{235}U.

V.5.2.1. - Ajustement des sections de la chambre à fission -

Nous savons que le calcul du flux dans les hétérogénéités, entre autre les cellules trou

---

(1) Ce test a été effectué sur un assemblage 3.1 % 12 BP de type 15 x 15 du coeur THIANGE.

d'eau qui contiennent la chambre à fission était mal rendu par le calcul DIANE, de ce fait une correction éventuelle des sections de l'^{235}U de la chambre à fission pourrait améliorer la carte d'activité.

Trois calculs d'ajustement par EQUIPAGE ont été réalisés sur les bibliothèques des assemblages enrichi à 3.1 %, 2.1 % et 2.6 % 16 pyrex à l'irradiation 12 000 MWJ/T et 600 ppm de bore. Nous avons retenu les corrections multiplicatives α des sections de l'^{235}U dans le groupe thermique :

- assemblage 2.1 % SP $\alpha = 1.1275$
- assemblage 2.6 % 16 BP $\alpha = 1.1565$
- assemblage 3.1 % SP $\alpha = 1.1557$

Les tableaux 5.8 et 5.9 montrent sur le huitième du coeur les écarts relatifs entre l'activité à 13 340 MWJ/T, avant et après correction des sections de l'^{235}U de la chambre à fission. Ceci a permis de corriger les écarts de 1% en périphérie et - 1% au centre.

Les assemblages enrichis à 2.1 % présentent un écart moyen de 0.65 %
" " " à 2.6 % " " " de 0.78 %
" " " à 3.1 % " " " de - 3.65 %

L'effet de damier est passé de 1.28 à 0.13 %.

L'amélioration des résultats reste insuffisante. Il y a lieu aussi d'appliquer une correction supplémentaire qui tient compte de l'effet 2D/3D.

V.5.2.2. Effet 2D/3D -

L'effet 2D/3D est lié à la représentation uniforme axialement du flux dans tous les assemblages du coeur. Cette simplification dans les calculs à deux dimensions a un effet limité en début du cycle mais elle ne l'est pas pour des taux de combustion élevés. Nous supposons que les corrections liées à l'effet 2D/3D déduites à 0 MWJ/T et 5% PN à partir de deux calculs résolvant l'équation de la diffusion par la méthode des éléments finis à 2 (BILAN) et 3 dimensions [1] sont conservatives au cours du cycle. Ces corrections sont appliquées à la distribution des activités avec corrections des sections de la chambre à fission à 13 340 MWJ/T.

Le tableau 5.10 montre après cette correction, que les écarts ont nettement regréssé tant au centre qu'en périphérie avec recalage de l'activité maximale dans le même assemblage avec l'expérience et définie avec un écart nul.

A 10 884 MWJ/T et à 13 340 MWJ/T le calcul DIANE montre que la fraction restante de poison est respectivement de 9.18 et 4.38 %, en accord avec celle donnée par le calcul APOLLO et d'autre calcul, ce qui élimine cette éventualité. Par ailleurs le calcul APOLLO multicellule sous-estime l'efficacité des poisons de 2 à 3%, mais il a été démontré qu'en faisant varier celle-ci de + 5%, la distribution d'activité est corrigée en périphérie de + 1.15% et de - 0.9 % pour les

C C/E C/E −1 %

C = Calcul Diane
E = Expérience

				1,039 1,040 − 0,1 %	0,595 0.616 − 3,4%		
			1,251 1,231 +1,6%	1,024 1,021 + 0,3 %	0,827 0,848 − 2,5 %	0,543 0,566 − 4,1 %	
		1,272 1,244 + 2,3%	1,086 1,073 + 1,2%	1,250 1,227 +1,9 %	0,999 1,010 −1,1 %	0,743 0,773 − 3,9%	
	1,274 1,245 + 2,3%	1,090 1,076 +1,3 %	1,271 1,248 +1,8%	1,077 1,073 +0.4%	1,207 1,193 +1,2 %	0,809 0,840 − 3,7 %	0,509 0,549 − 7,3%
assemblage central →		1,273 1,246 +2,2 %	1,078 1,072 +0,6%	1,260 1,233 +2,2%	1,045 1, 043 + 0,2 %	1,081 1,088 − 0,6%	0,609 0,651 − 6,5%

Tableau 5-8 . Comparaison des activités entre le calcul DIANE et l'expérience à 13340 MWJ/T. 100% PN et 137 ppm de bore .

C E $\frac{C}{E}$ −1%

C = Calcul
E = Expérience

				1,029 1,040 −1,06	0,600 0,616 − 2,60		
			1,239 1,231 0,65	1,033 1,021 1,18	0,833 0,848 −1,77	0,548 0,566 − 3,18	
		1,259 1,244 1,21	1,095 1,073 2,05	1,237 1,227 0,81	1,008 1,010 −0,20	0,749 0,773 − 3,10	
	1,261 1,245 1,29	1,100 1,076 2,23	1,259 1,248 0,88	1,086 1,073 1,21	1,195 1,193 0,17	0,814 0,840 − 3,10	0,514 0,549 −6,37
assemblage central →		1,261 1,246 1,20	1,087 1,072 1,40	1,247 1,233 1,14	1,055 1,043 1,15	1,071 1,088 −1,56	0,615 0,651 − 5,53

Tableau 5-9 . Comparaison des activités entre le calcul DIANE et l'expérience à 13340 MWJ/T ; 100% PN et 137 ppm de bore avec correction des sections thermiques de la chambre à fission.

				1,040 1,040 0,00	0,614 0,616 − 0,32		
			1,234 1,231 0,24	1,035 1,021 1,37	0,842 0,848 − 0,71	0,562 0,566 − 0,71	
		1,247 1,244 0,24	1,087 1,073 1,30	1,234 1,227 0,57	1,013 1,010 0,30	0,762 0,773 − 1,42	
	1,244 1,245 − 0,08	1,087 1,076 1,02	1,248 1,248 0,00	1,080 1,073 0,65	1,196 1,193 0,25	0,822 0,840 − 2,14	0,527 0,549 − 4,00
assemblage central →		1,246 1,246 0,00	1,077 1,072 0,47	1,240 1,233 0,57	1,054 1,043 1,05	1,079 1,088 −0,83	0,627 0,651 − 3,69

Tableau 5-10 . Comparaison des activités entre le calcul DIANE et l'expérience à 13340 MWJ/T ; 100 % PN et 137 ppm de bore avec :

- correction de la chambre à fission
- correction de l'effet 2D/3D.

assemblages enrichis à 2,6 % en début de vie.

V.5.2.3. - Distribution de puissance et d'activité

Les tableaux 5.11 et 5.12 montrent des comparaisons sur les cartes d'activité et de puissance entre les calculs DIANE et BILAN à l'irradiation de 10 884 MWJ/T.

On remarque que dans les deux distributions d'activité et de puissance, le calcul DIANE surestime la puissance et l'activité dans les assemblages centraux et les sous-estime en périphérie du coeur. Quant au tableau 5.13, il montre les écarts sur le taux de combustion à 14 979 MWJ/T par type d'assemblage. L'assemblage enrichi à 2.1% a brûlé d'avantage ce qui en principe pénalise la puissance dans ce type d'assemblage. L'écart ainsi constaté permet d'expliquer l'effet de damier de 1.28 % à 13 340 MWJ/T. En revanche l'assemblage enrichi à 3.1 % en périphérie est plus réactif, ayant moins brûlé, l'activité et la puissance y sont sous estimées par rapport au calcul BILAN. Ce qui nous conduit à penser que le basculement de la carte d'activité est plutôt une conséquence d'un calcul non adéquat des constantes de réflecteur ; d'ailleurs ces constantes sont calculées dans une géométrie à une dimension, alors que le calcul DIANE est effectué à deux dimensions.

Au cours des différentes comparaisons sur les cartes d'activité entre l'expérience et le calcul DIANE nous avons remarqué que certains assemblages périphériques ayant deux faces communes avec le réflecteur présentaient des écarts légèrement plus élevés, ce qui laisse penser à un effet de variation du spectre dans ces assemblages. En effet leurs constantes neutroniques ont été calculées dans un flux plat en milieu infini d'où le déséquilibre constaté sur la carte. On montre que cet effet a tendance à diminuer en valeur absolue l'écart sur l'activité en périphérie du coeur de 1.2 %. Dans tous les cas le calcul DIANE a montré que les effets des températures du modérateur et du combustible ont été bien pris en compte.

Type d'assemblage	Taux de combustion DIANE (D) MWJ/T	Taux de combustion BILAN (B) MWJ/T (1)	$\frac{D - B}{B}$ %
2.1% sans poison	16 505	16 260	+ 1.5
2.6% 12 BP	16 901	17 178	- 1.6
2.6% 16 BP	16 646	16 803	- 0.9
2.6% 20 BP	17 460	17 457	0.
3.1% sans poison	9 840	9 870	- 0.3
3.1% 12 BP	13 905	14 018	- 0.8
3.1% 16BP	14 072	14 815	- 2.6

TABLEAU 5.13. - COMPARAISON A 14 979 MWJ/T DES TAUX COMBUSTION ENTRE LES CALCULS A DEUX DIMENSIONS DIANE ET BILAN AVEC CONTRE-REACTIONS

D D/B −1%

D = Calcul Diane
B = Calcul Bilan

				0,897 0,899 −0,2	0,671 0,670 +0,1		
			1,108 1,090 +1,7	1,085 1,095 −0,9	0,985 0,998 −1,3	0,605 0,611 −1,0	
		1,146 1,119 +2,4	1,183 1,183 0,0	1,104 1,087 +1,6	1,050 1,067 −1,6	0,843 0,855 −1,4	
	1,154 1,122 +2,8	1,202 1,195 +0,6	1,142 1,115 +2,4	1,167 1,171 −0,3	1,059 1,051 +0,8	0,964 0,993 −3,0	0,566 0,578 −2,1
assemblage central →	1,194 1,188 +0,5	1,151 1,120 +2,8	1,180 1,181 +0,1	1,123 1,103 −1,8	1,128 1,140 −1,1	0,935 0,945 −1,1	0,692 0,723 −4,2

Tableau 5-11. Comparaison des distributions de puissance entre les calculs DIANE et BILAN avec contre-réactions à 10844 MWJ/T.

				1,023 1,031 −0,8	0,584 0,590 −1,0		
			1,253 1,254 +0,6	1,008 1,006 +0,2	0,807 0,830 −2,8	0,532 0,546 −2,6	
		1,296 1,279 +1,3	1,094 1,079 +1,4	1,248 1,242 +0,5	0,981 0,988 −0,7	0,733 0,752 −2,5	
	1,305 1,284 +1,6	1,112 1,092 +1,8	1,291 1,276 +1,2	1,079 1,069 +0,9	1,200 1,204 −0,3	0,791 0,808 −2,1	0,498 0,516 −3,5
assemblage central →		1,302 1,283 +1,5	1,091 1,070 +2,0	1,270 1,261 +0,7	1,039 1,049 −1,0	1,066 1,088 −2,0	0,599 0,629 −4,8

Tableau 5-12. Comparaison des activités calculées par DIANE et BILAN avec contre-réactions à 10844 MWJ/T.

V.6 - TEMPS DE CALCUL COEUR

En dépit de ces difficultés, relatives aux constantes neutroniques en périphérie du coeur, on a considéré comme référence le calcul de coeur effectué avec un paramétrage PARASITE utilisant le critère ε = 10 pcm ; on pourrait comparer les résultats obtenus avec un calcul effectué avec un paramétrage à ε = 30 pcm, afin de réduire le temps de calcul des sections efficaces macroscopiques. On doit alors s'attendre à une légère perte de précision sur l'effet Doppler. Le tableau 5.14 met en évidence le temps consacré par le code DIANE, pour le calcul des sections macroscopiques qui est au moins deux fois supérieur à celui réservé proprement au calcul de diffusion.

Nombre d'itération sur :		Temps de calcul (en secondes)	
Puissance (10^{-3})	Valeur propre (10^{-8})	Sections macroscopiques	Diffusion
2	11	68	29
	3	68	9

TABLEAU 5.14 - TEMPS DE CALCUL COEUR AVEC EFFETS DE CONTRE-REACTIONS (ε = 10 pcm)

Avec le cas à ε = 30 pcm, on peut prévoir à partir du tableau 3.17, que le temps de calcul coeur pour la partie "sections macroscopiques" ne sera que de 32 x 157 (1/4 d'assemblage) $\sim$ 50 secondes par itération sur la puissance, sachant à priori que la convergence sur la puissance est obtenue par deux itérations et que celles relatives au calcul de diffusion ne changent pas. C'est ainsi qu'on espère une réduction sur le temps de calcul de plus de 10 % ; ceci reste faible comme il a été signalé dans le chapitre III.5.C.

Dans le même but, on peut procéder autrement en ne déclarant que les sections des groupes 3 et 4 dépendantes des effets de contre-réactions lors des calculs de coeur (ε = 10 pcm) ; en veillant bien sûre, d'accorder aussi l'importance aux réactions de transfert et de diffusion dans tous les groupes du corps 10. On pourrait alors conserver la précision du premier cas sans perdre sur coût du calcul appréciable.

V.7. - CONCLUSION

La dérive importante de réactivité évaluée à plus de 1 000 pcm (figure 5.3) est due essentiellement :

- aux constantes neutroniques évolutives des bibliothèques déterminées à une concentration moyenne en bore de 600 ppm, au lieu de les recalculer pour les différentes concentrations critiques du bore
- à une sous-estimation de l'efficacité initiale des poisons consommables
- à l'autoprotection des isotopes de l'Uranium 235 et 238 ainsi que le Plutonium 239 qui n'est pas recalculée en évolution

- à une diminution de la température effective du combustible en évolution ,
- au traitement des sections efficaces par DIANE qui conduit à un écart de réactivité par rapport au calcul APOLLO ;
- au calcul des constantes neutroniques des assemblages enrichi à 3.1 % en milieu infini ;
- lié au calcul 2D au lieu de 3D.

Il faut tenir compte du spectre réel dans ces assemblages.

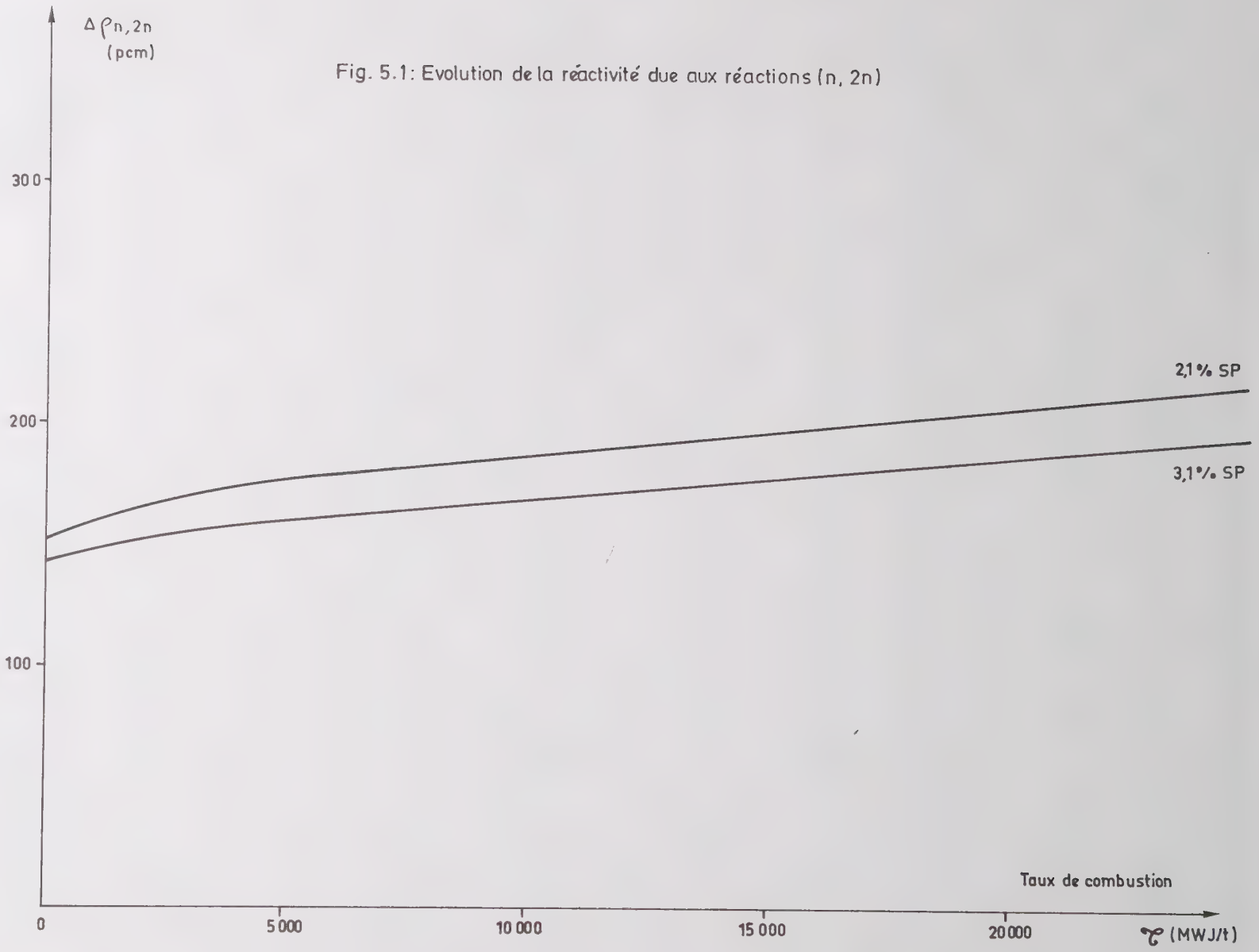
Comparées à l'expérience, les cartes d'activité calculées sont satisfaisantes en début du cycle tant au centre qu'à la périphérie. En fin de cycle, les assemblages périphériques présentent des écarts dépassant les 3%. L'effet damier qui intéresse les assemblages enrichis à 2.1 et 2.6% n'est pas important, ce qui permet de conclure que les effets de contre-réactions sont bien pris en compte par le calcul DIANE.

Une amélioration des écarts calcul-expérience en périphérie en fin de cycle a pu être obtenue par :

- ajustement des taux de réactions entre les calculs de diffusion et de transport dans des chambres à fission, qui diminue l'écart de 1%
- la prise en compte de l'effet 2D/3D car la distribution du flux axial varie d'un assemblage à un autre.

La sous-estimation en début de vie de la puissance dégagée dans les assemblages enrichis à 3,1 % est compensée par une surestimation dans les assemblages du centre (assemblage enrichi à 2,1 %). En conséquence l'activité calculée et la vitesse de combustion suit les mêmes tendances (tableau 5.13). Il faut tenir compte du spectre réel dans les assemblages en périphérie (en particulier le 3,1 % sans poison) au lieu de les calculer en milieu infini avec prise en compte du nombre de faces communes au réflecteur. Cette correction réduira au moins de 1 % l'écart sur l'activité en périphérie. La correction des constantes neutroniques du réflecteur hétérogène équivalent conduirait à améliorer les résultats dans les assemblages périphériques du coeur.

Fig. 5.1: Evolution de la réactivité due aux réactions (n, 2n)



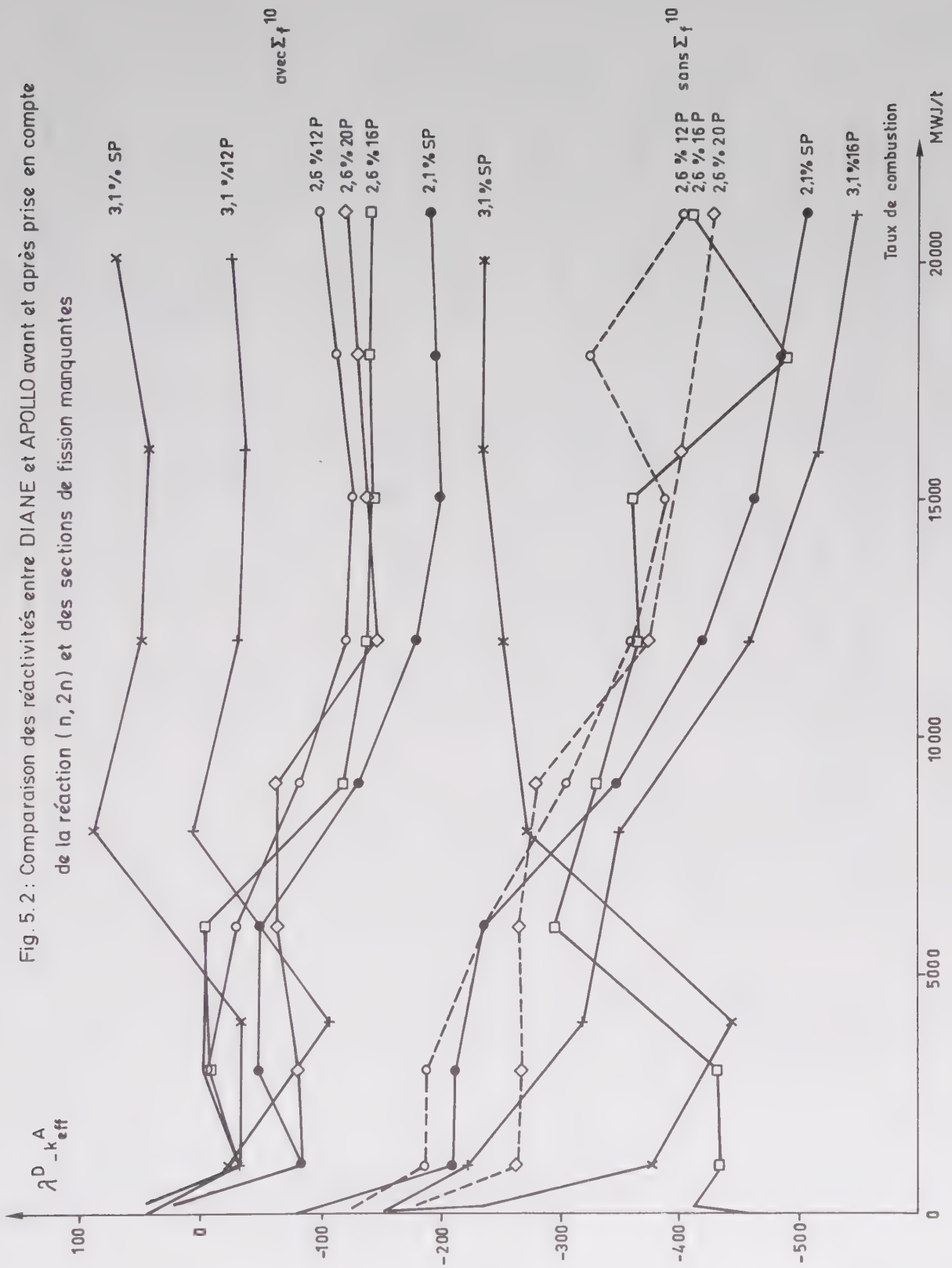
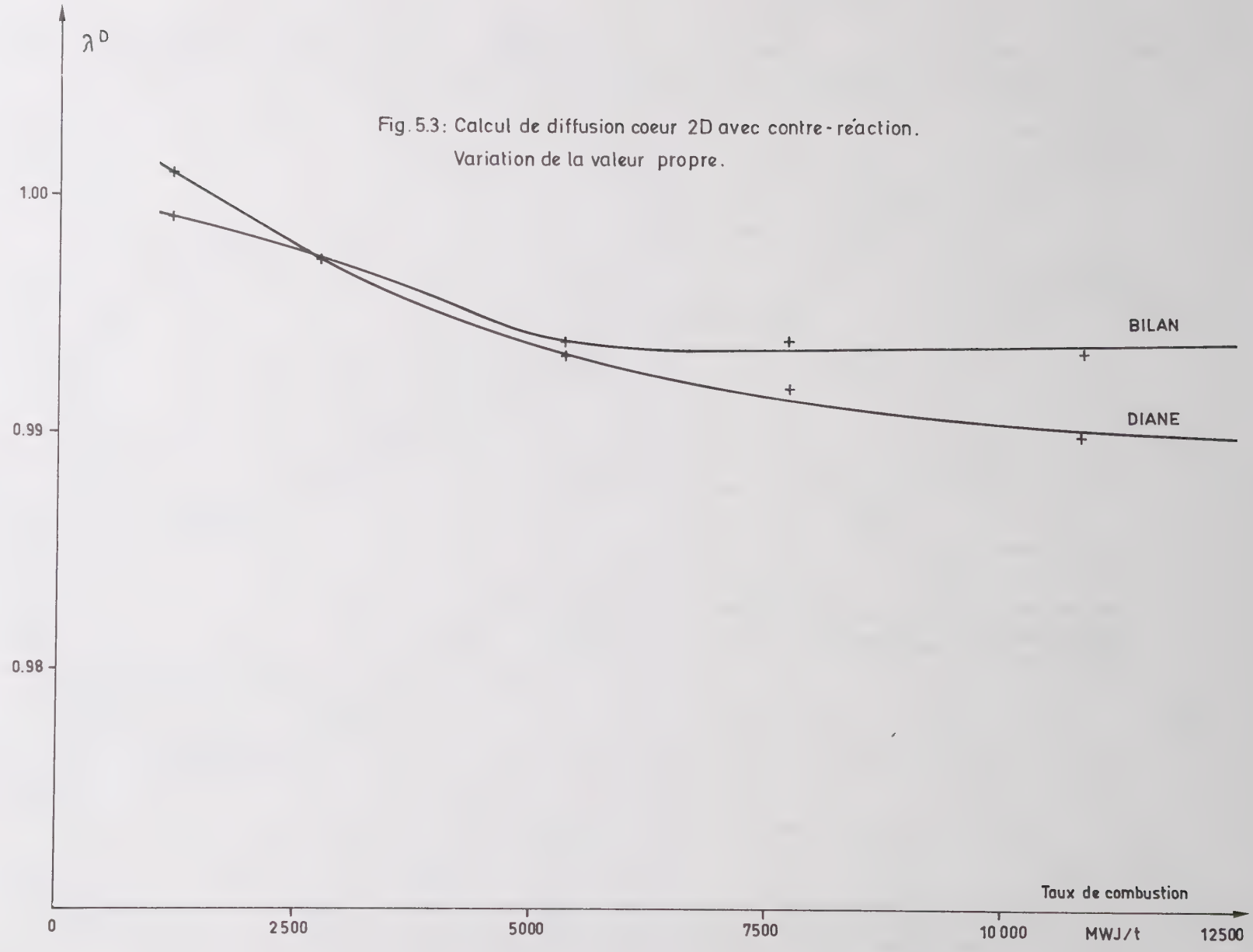


Fig. 5.2 : Comparaison des réactivités entre DIANE et APOLLO avant et après prise en compte de la réaction (n, 2n) et des sections de fission manquantes

Fig. 5.3: Calcul de diffusion coeur 2D avec contre-réaction.
Variation de la valeur propre.



CONCLUSION GENERALE

L'étude entreprise dans cette thèse est la construction de bibliothèques neutroniques à effets de contre-réactions permanents, pour les calculs de diffusion des réacteurs à neutrons thermiques (en l'occurence FESSENHEIM) par la méthode des différences finies. L'étude vise en particulier, la détermination optimale du nombre de sections efficaces sensibles aux effets de température et la recherche de formes polynômiales de plus bas degrés des corrections multiplicatives, liées aux effets de température, qui affectent les sections susceptibles de varier. Cette étude comprend :

- une recherche élémentaire des sections efficaces sensibles aux effets de contre-réactions au niveau de cellules combustibles et la déduction d'un critère de précision sur la réactivité et l'utilisation du programme d'interface PARASITE pour le paramétrage des corrections liées aux effets de températures à l'irradiation de12 000 MWJ/t et 600 ppm de bore ;

- une analyse des contre-réactions au niveau d'assemblages en fonction d'un certain nombre de paramètres tels que l'irradiation, le poison consommable, le couplage des effets de température et le bore ;

- le calcul d'évolution du cycle 1 du réacteur FESSENHEIM avec prise en compte des effets de contre-réaction. Une synthèse de travaux similaires a permis l'interprétation des écarts calcul-expérience.

1. Dans l'étude de sensibilité des sections efficaces vis-à-vis des contre-réactions nous avons noté, à 12 000 MWJ/t et 600 ppm, la plupart des réactions thermiques (groupe 4), les réactions épithermiques (groupe 3) de certains isotopes ayant un poids important dans le bilan neutronique (section ou concentration importante telle que ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu, ^{240}Pu et le corps 10). 41 % des sections sont sensibles à l'effet de densité de l'eau.

L'effet Doppler est dû essentiellement aux isotopes ayant des résonances dans le domaine épithermique (l'^{238}U et le ^{240}Pu). La contribution de l'^{235}U et du ^{239}Pu reste faible avec une compensation approximative de l'absorption et de la fission. L'effet Doppler représente 19 % de l'ensemble des sections.

Une étude complémentaire a montré que la variation des sections d'un corps avec la température ne dépend pratiquement que de la nature de la réaction du corps et très peu de sa concentration et de son environnement.

Le paramétrage PARASITE des corrections, liées aux effets de températures, en fonction de la valeur du critère de précision, a montré par comparaison avec les coefficients de température qu'une précision uniforme de 10 pcm sur le bilan de réactivité aux différentes températures permettait de garantir une précision suffisante sur le calcul des effets de puissance. Des polynômes cubiques se sont avérés nécessaires pour représenter les réactions thermiques (absorption et fission) de l'^{235}U en fonction de la densité de l'eau et l'absorption épithermique de l'^{238}U en fonction de la température du combustible. L'écart absolu introduit par PARASITE sur le coefficient de température du modérateur est inférieur à 1 pcm/°C et 0,1 pcm/°C pour le coefficient Doppler, ce qui est satisfaisant. Il est remarquable que la nature de l'ajustement (degré du polynôme correctif), dépende essentiellement de la réaction et de l'isotope, et soit relativement insensible à l'environnement et à la géométrie.

2. L'analyse de l'hypothèse de l'indépendance des corrections liées à l'effet de densité de l'eau vis-à-vis du taux de combustion, a montré que les écarts des coefficients de température du modérateur entre les calculs DIANE et APOLLO :

- en début de vie, ils se sont révélés moins satisfaisants en particulier pour des températures du modérateur loin de celle de référence (306 °C). Il faut incriminer les sections de l'^{235}U et de transfert épithermique en énergie. Dans le cas d'un assemblage avec du poison consommable, ces corrections surestiment l'efficacité du poison ce qui conduit à sous-estimer le coefficient du modérateur en valeur absolue ;

- à 24 000 MWJ/t, les écarts absolus sur le coefficient du modérateur sont satisfaisants, qui sont induits par les isotopes du plutonium et la section du transfert épithermique.

Quelle que soit l'irradiation, le coefficient Doppler est mieux estimé. Le découplage des effets de densité de l'eau et de la température du combustible est pleinement justifié.

L'influence d'une augmentation de la concentration en bore a tendance à accroître l'écart absolu du coefficient de température du modérateur entre les calculs DIANE et APOLLO, mais celui-ci reste inférieur à 1 pcm/°C. Les corrections, liées à la densité de l'eau, ne sont pas concernées par la variation de la concentration du bore, quant aux sections nominales, elles en dépendent et les erreurs induites sur la réactivité par chacune des sections se compensent complètement.

3. Moyennant tous ces résultats qui se révèlent acceptables pour l'évolution du premier coeur FESSENHEIM en tenant compte des effets de puissance (contre-réactions). Les résultats obtenus ont montré :

- Une dérive de réactivité, évaluée à plus de 1000 pcm, qui est due principalement :

. aux noyaux de l'^{235}U, de l'^{238}U et du ^{239}Pu dont l'autoprotection n'est pas recalculée en évolution ;

. à une sous-estimation de l'efficacité du poison initial, lié au modèle de calcul (option multicellule du code APOLLO) ;

. à une surestimation, en début de vie, de la réactivité introduite et qui est due aux réactions (n, 2n) ; la prise en compte de l'évolution de ces réactions atténue la dérive constatée ;

. aux constantes neutroniques qui évoluent dans le temps, avec un titre moyen en bore de 600 ppm ;

. à une diminution de la température effective du combustible en évolution ;

- Par ailleurs les résultats des calculs de coeur ont montré, par comparaison avec l'expérience, que :

. au cours de la montée en puissance, les écarts relatifs moyens, sur la distribution d'activité, par type d'assemblage sont faibles ;

. en fin de cycle, ces écarts dépassent 3 % dans les assemblages en périphérie du coeur et que les assemblages centraux présentent des écarts relatifs qui sont à la limite des 2 %.

Une réduction de 1 % en fin de cycle sur l'écart moyen en périphérie du coeur a été obtenue par correction des sections efficaces thermiques de la chambre à fission en ajustant les taux de réaction entre les calculs de diffusion et de transport (APOLLO). L'effet 2D/3D qui tient compte de la distribution du flux axial dans chaque assemblage améliore encore les écarts entre le calcul et l'expérience.

La prise en compte du spectre réel d'une part dans les assemblages périphériques (seulement ceux enrichis à 3,1 % sans poison) permettra de réduire de 1,2 % l'écart relatif en périphérie. D'autre part, l'expérience actuelle du calcul des constantes de réflecteur hétérogène, est moins étendue qu'elle ne l'est pour le réflecteur homogène, utilisé dans les codes aux éléments finis, sans doute pour des raisons de coût de calcul élevé et qu'une distribution fine de puissance n'est pas toujours indispensable (du moins pour le suivi des réacteurs de grande dimension).

Le temps de calcul de coeur avec contre-réactions pourrait être encore réduit, avec cependant une dégradation de la précision sur l'effet Doppler, en ne déclarant dépendantes des effets de température que les sections des deux derniers groupes d'énergie (thermique et épithermique). On pourrait même envisager d'utiliser un paramétrage PARASITE, en imposant un critère de précision sur la réactivité égal à 30 pcm. Pour ce dernier point, on estime, par itération sur la puissance (sachant que deux suffisent pour converger pour une précision d'un millième), qu'une diminution d'au moins de 10 % sur le coût de calcul pourrait être réalisée.

L'exemple traité dans l'annexe concernant la possibilité d'étendre les corrections liées aux effets de contre-réactions, établies pour un type d'assemblage, aux autres assemblages est prometteur, avec une certaine restriction pour les assemblages ayant des enrichissements très différents (voir III.A.6.2) dans un domaine de température du modérateur restreint [286 °C - 306 °C]. Une suggestion peut alors être faite afin de réduire le nombre de calculs de contre-réactions par le code APOLLO :

. assemblage enrichi à 2,1 % sans poison
. " " " 3,1 % " "
. " " " 3,1 % avec 16 barreaux de pyrex
. " " " 2,6 % " " " " "

L'étude des cycles ultérieurs, cycle à l'équilibre par exemple, risque d'être entachée d'une erreur croissante avec l'irradiation, si les bibliothèques à contre-réactions constituées à 12 000 MWJ/t sont conservées ; en effet la production de plutonium et l'accumulation des produits de fission modifient les effets de puissance calculés à 12 000 MWJ/t et imposés à tous les autres états d'irradiation. Le développement récent [10] des bibliothèques NEPLIB 3 permet d'améliorer cette situation, abandonnant l'hypothèse de séparabilité des variables températures et irradiation. NEPLIB 3 sera une bibliothèque tabulée, dans laquelle les effets de température à toute irradiation seront estimés par une interpolation linéaire entre les états d'irradiation extrêmes, des rapports de flux calculés pour chaque température dans chacun des groupes du calcul de transport APOLLO.

REFERENCES

[1] A. BOIVINEAU
Système NEPTUNE. Manuel d'utilisation du module APOLLO.
Rapport SERMA/SPM n° 435 DR

[2] J. MONDOT
EQUIPAGE. Détermination des constantes équivalentes pour les calculs de diffusion aux différences finies en géométrie X, Y.
Note technique SEN/LPN 77/031

[3] A. SANTAMARINA
VELPO. Code d'interface APOLLO-EVOE.
Rapport SERMA n° 174 T

[4] F. CARRE, C. LAURENT, M. PERNOT
Prise en compte des effets de contre-réaction dans les calculs de diffusion aux différences finies : paramétrage des sections efficaces.
Note SERMA T-1471

[5] D. CAER, Ch. DILLET, M. DUMAS, M.F. FOURQUET, A. KAVENOKY, J.J. LAUTARD, P. QUILICHINI, M. RAVIER, J.M. RIEUNIER, D. ROBEAU
NEPTUNE. Un système modulaire pour le calcul des réacteurs à eau.
Rapport SERMA/SPM n° 228 DR

[6] E. KAMHA
Contribution à l'élaboration et à la qualification d'un schéma de calcul pour la gestion des réacteurs PWR, à l'aide du système NEPTUNE. Suivi du réacteur FESSENHEIM 2
(Thèse Université d'ORSAY, 1981)

[7] J.P. LEBRUN, F. CARRE
Prise en compte des effets de contre-réaction par la paramétrisation des sections efficaces : estimation de l'erreur de méthode.
Note SERMA T-1447

[8] A. LOTTIN
Communication personnelle.

[9] D. TOURNIER
Contribution à la qualification du système NEPTUNE. Application au suivi de TIHANGE.
(Thèse, Université d'ORSAY, 1980)

[10] F. SAIH
Elaboration d'un schéma de calcul des sections efficaces tenant compte des effets de contre-réaction dans un réacteur à eau légère pressurisée.
(Thèse, Université d'ORSAY, 1982)

ANNEXE - CAS PARTICULIER DE L'ASSEMBLAGE 2.6 % 20 BP

Les calculs APOLLO de puissance de l'assemblage 2.6 % 20 BP ont été effectués avec une puissance dix fois supérieure à la puissance nominale, les valeurs propres APOLLO de référence se trouvent sous estimées du fait d'une sur-estimation du Xénon. Cependant le calcul d'évolution APOLLO de cet assemblage est fait à la puissance nominale. Nous avons recouru aux différentes valeurs du $K\infty$ des autres assemblages de même enrichissement mais qui diffèrent par le nombre de poisons consommables, en essayant de dégager une loi de variation du $K\infty$ et du nombre de de noyaux de Xénon en fonction du nombre de poisons aux différentes températures. En fait il y a deux raisons majeures, les calculs de puissance effectués par APOLLO sont assez coûteux, d'une part et d'autre part l'assemblage 2.6 % 20 BP ne représente que 2% de tous les assemblages qui existent dans le coeur.

Disposant d'un seul calcul de contre-réaction APOLLO du cas [1] 2.6 % sans poison dans les conditions nominales, nous traçons la variation de la valeur propre APOLLO en fonction du nombre de poisons consommables. Ensuite par simple extrapolation nous déduisons la valeur propre correspondante à celle qu'aurait donné le calcul APOLLO pour l'assemblage 2.6 % 20 BP (figure 1).

Soit $K\infty = 0.99950$ valeur lue à $T_m^* = 306°C$ et $T_c^* = 651°C$, valeur qui est d'ailleurs conforme à celle qu'on pourrait prévoir à partir du $K\infty = 0.99793$ correspondant, obtenu à partir du calcul d'évolution, sachant qu'il doit y avoir un écart de - 150 pcm dû à l'autoprotection.

En conclusion, la méthode de déduction de la valeur propre de référence APOLLO, par extrapolation sur le nombre de poisons peut être étendue aux autres températures modérateur et combustible, cette méthode est aussi utilisée pour déterminer le nombre de noyaux du Xénon aux autres températures du modérateur pour des calculs ultérieurs DIANE (figure 2).

Calculs DIANE des contre-réactions de l'assemblage 2.6 % 20 BP

Le problème se pose autrement au niveau de DIANE, du fait de la nécessité de la formation d'une bibliothèque qui puisse être insérée avec les autres bibliothèques et donner une bonne approximation dans un calcul coeur à deux dimensions.

Les coefficients des polynômes $\sigma(\tau)$ pour un calcul d'évolution étant corrects, le problème est de trouver ceux des polynômes en $\pi(NH_2O)$ et $\pi(P/P*)$ pour les corrections dues aux effets de températures modérateur et combustible. L'idée est d'utiliser les coefficients obtenus à partir des calculs APOLLO de contre-réactions correspondants à 10 fois P_N et ensuite d'essayer ceux de l'assemblage 2.6 % 16 BP qui pourrait posséder les mêmes propriétés neutroniques. Nous groupons dans le tableau ci-après, les différents résultats obtenus en utilisant l'un ou l'autre jeu de coefficients $\pi(NH_2O)$ et $\pi(P/P*)$.

Commentaires

Une approximation peut être faite sur les écarts qu'il doit y avoir entre DIANE et

---

(1) Cet assemblage ne figure pas dans le premier cycle du coeur

APOLLO dans les différentes températures, en augmentant de - 30 pcm ceux obtenus dans le cas 2.6 % 16 BP, ceci est dû à l'effet du poison qui tend à augmenter (en valeur absolue) l'écart DIANE-APOLLO d'une valeur constante pour toutes les températures modérateur et combustible. Cette façon d'analyser, permettra de valider qualitativement les deux bibliothèques ainsi obtenues et d'en éliminer une.

Effet Doppler

L'approximation qui vient d'être annoncée permet, de constater aisément que la bibliothèque comportant les coefficients de $\pi(NH_2O)$ et $\pi(P/P*)$ du cas 2.6 % 16 BP répond à l'approximation dans toutes les températures combustible.

Effet Modérateur

Pour l'effet modérateur, l'approximation est partagée entre les deux bibliothèques.

Entre les températures T_m = 200°C et T_m = 306°C, la bibliothèque utilisant les fonctions $\pi(NH_2O)$ et $\pi(P/P*)$, relatives à 16 barreaux de pyrex est satisfaisante.

Entre les températures T_m = 306°C et T_m = 340°C, plutôt la bibliothèque ayant les fonctions $\pi(NH_2O)$ et $\pi(P/P*)$ correspondant à 10 P_N est satisfaisante.

Conclusion

En tenant compte du domaine des variations de la température du modérateur entre 286 et 306°C qui fera l'objet de notre étude au niveau du coeur, nous optons pour la bibliothèque aux coefficients combinés et qui représentera l'assemblage enrichi à 2.6 % avec 20 barreaux de pyrex.

Assemblage : 2.6 % 20 BP, 12 000 MWJ/t 600 ppm de bore

Comparaisons des réactivités entre DIANE (avec activation) et APOLLO

Température modérateur (°C)	Température combustible (°C)	K∞ DIANE	K∞ (1) APOLLO	$\frac{K\infty_D - K\infty_A}{K_A}$ (pcm)
200	650	1.01000 1.00955	1.01086	- 85 - 130
286	650	1.00178 1.00167	1.00400	- 221 - 232
306	650	0.99725 0.99725	0.99950	- 225 - 225
320	650	0.99295 0.99306	0.99521	- 227 - 216
340	650	0.98130 0.98162	0.98403	- 278 - 245
306	200	1.01080 1.01131	1.01349	- 6 - 215
306	286	1.00796 1.00836	1.01086	- 287 - 247
306	650	0.99725 0.99725	0.99950	- 225 - 225
306	850	0.99232 0.99214	0.99422	- 191 - 209
306	1500	0.97817 0.97759	0.98020	- 207 - 266

K∞(1) : valeur propre APOLLO déterminée par extrapolation sur le nombre de poisons

X	valeur propre du calcul DIANE ($\pi(NH_2O)$ et $\pi(P/\Gamma*)$ correspondant à 10 P_N)
X	" " " " " " sont issues du cas 2.6% 16 BP)

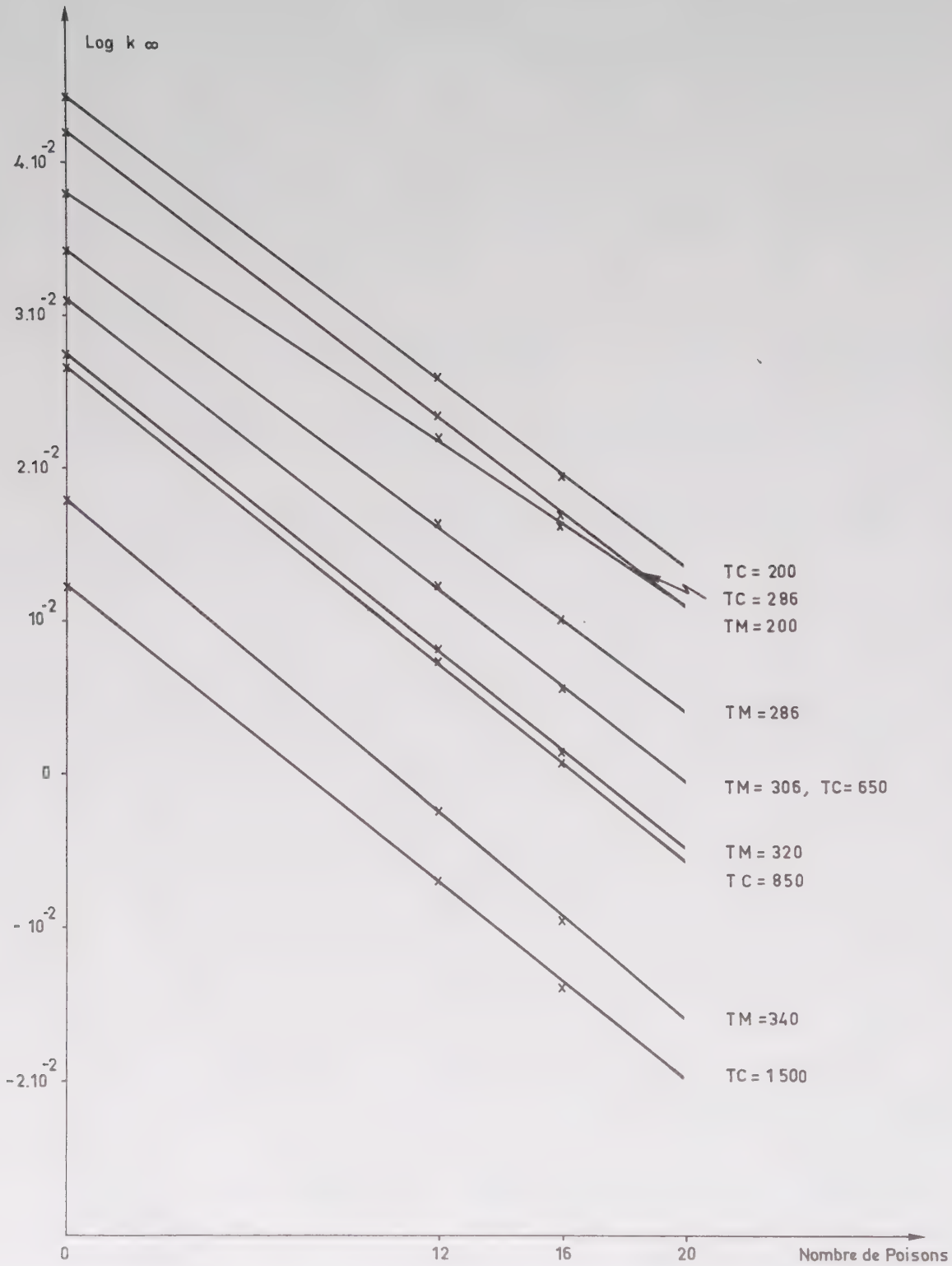


Fig. 1: Variation du k ∞ Apollo en fonction du nombre de poison pour l'assemblage enrichi à 2,6 %

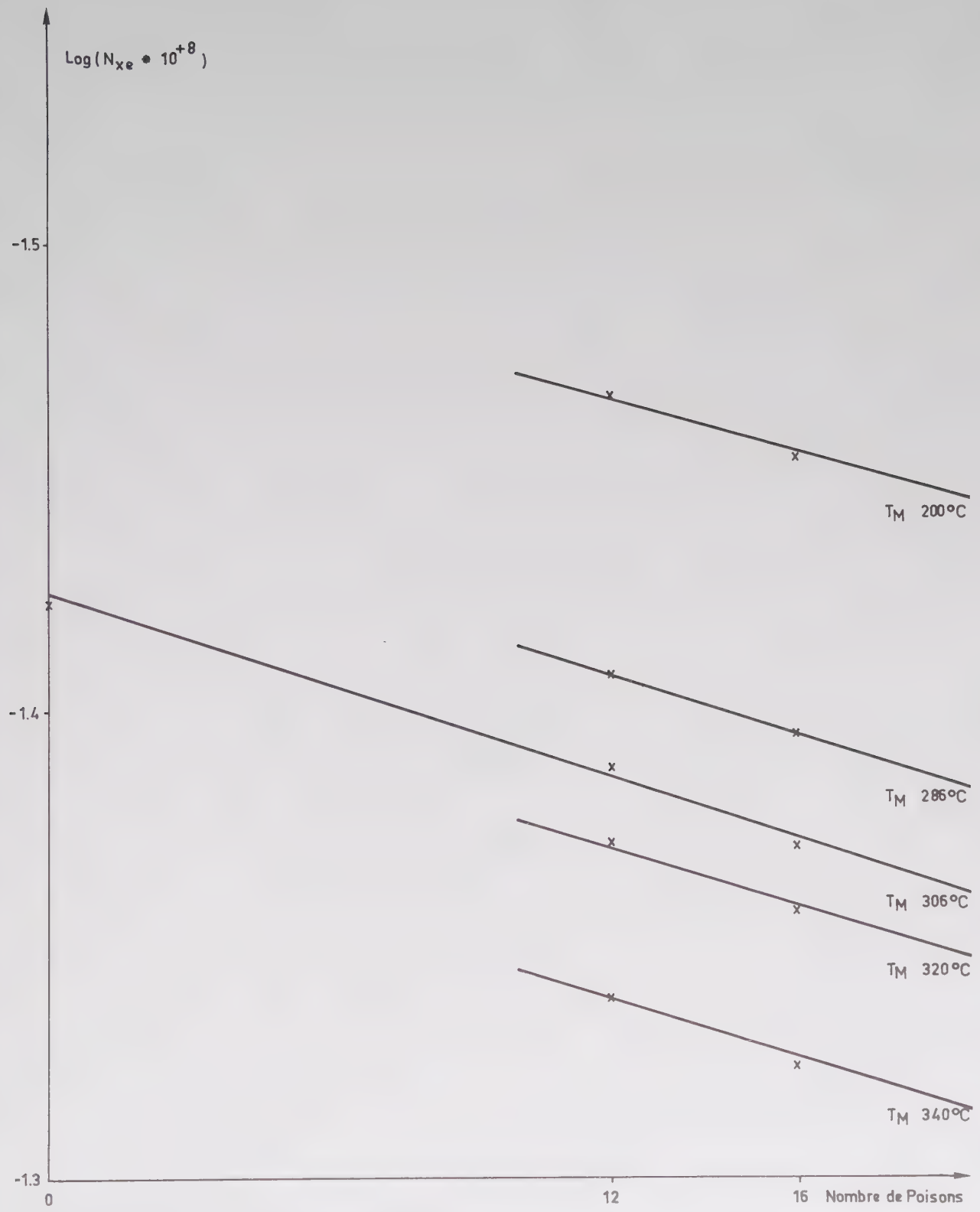
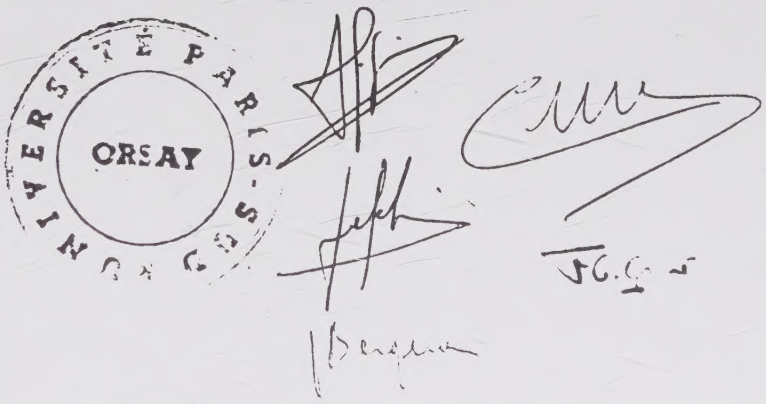


Fig. 2 : Variation du nombre de noyaux ^{135}Xe en fonction du nombre de poisons ; assemblage enrichi à 2,6 % (cellule standard)

Vu et approuvé

ORSAY, le 24 septembre 1982

Les Membres du Jury